COSMOLOGÍA
El rompecabezas de la energía oscura

NEUROCIENCIA
¿Cómo elimina el cerebro las toxinas?

CAMBIO CLIMÁTICO
Refugiados sirios, víctimas de las sequías

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

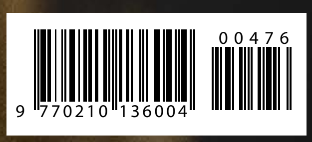
40 ANIVERSARIO 1976 - 2016

Mayo 2016 InvestigacionyCiencia.es
Edición española de Scientific American

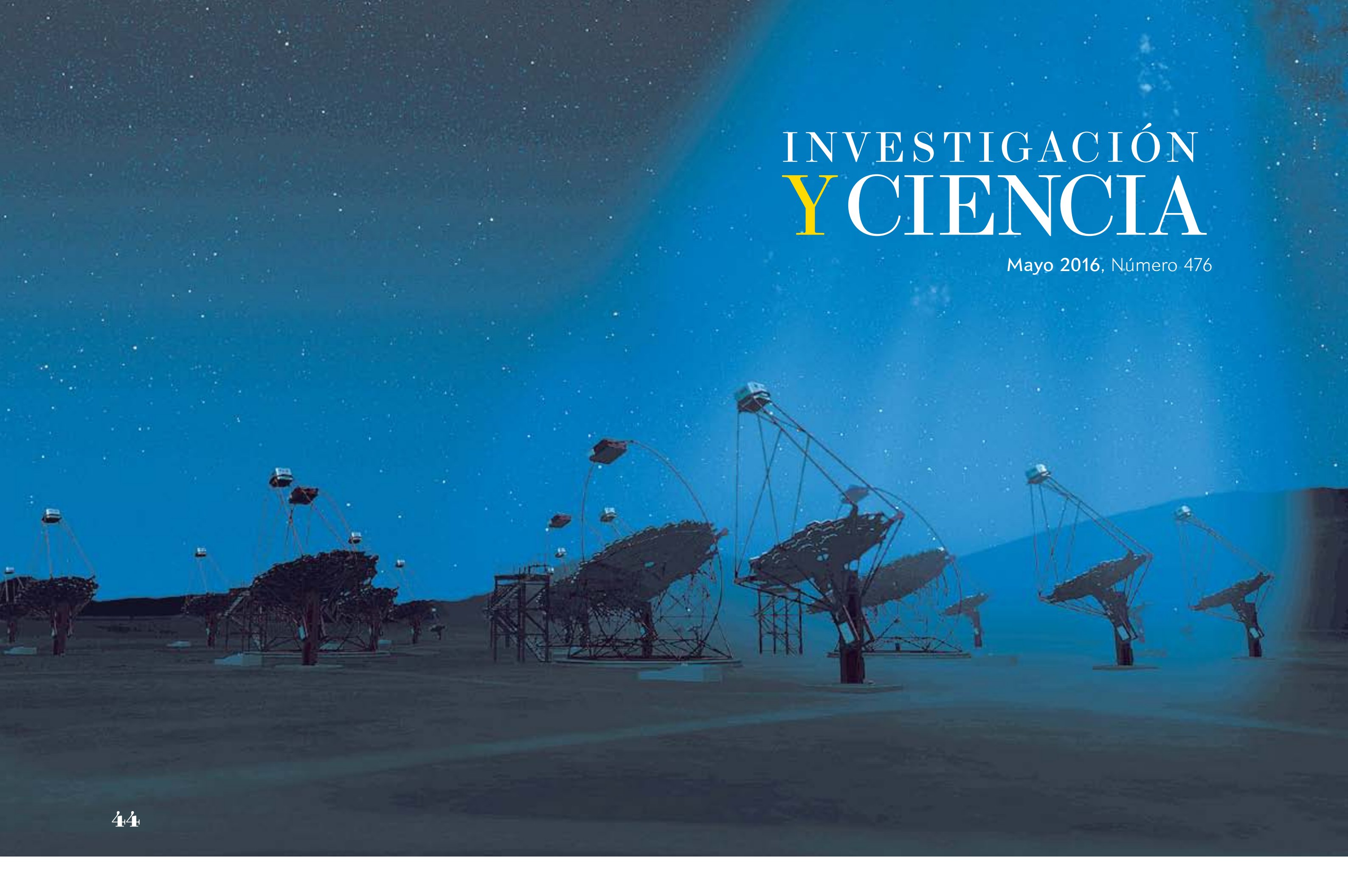
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
MAYO 2016 N.º 476
EL MISTERIOSO *HOMO NALEDI* | EL ROMPECABEZAS DE LA ENERGÍA OSCURA | TOXINAS EN EL CEREBRO

ANTEPASADO MISTERIOSO

El hallazgo fósil de una nueva especie, *Homo naledi*, ha suscitado un acalorado debate sobre nuestros orígenes

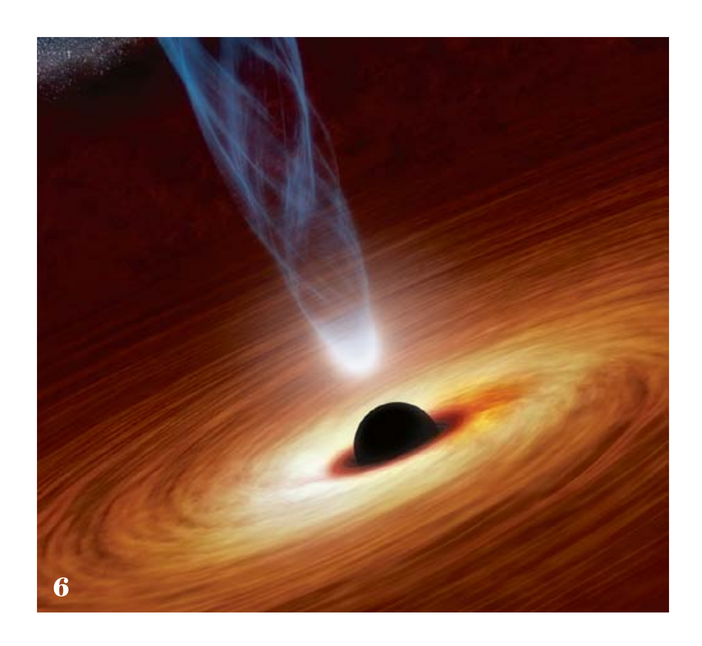


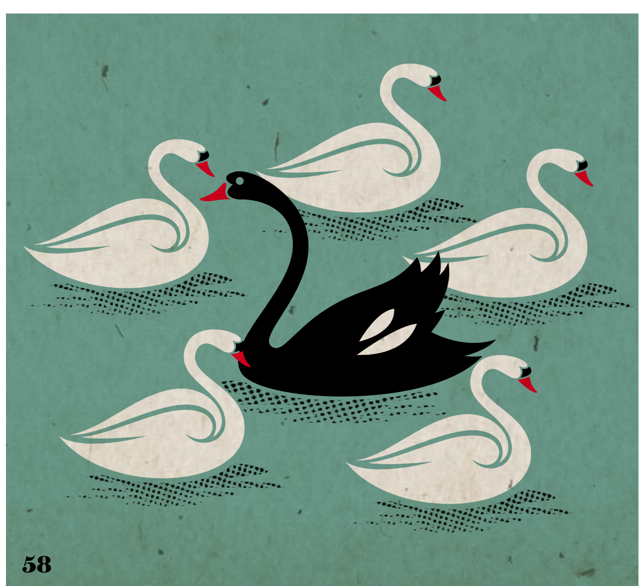
6,90 EUROS



ARTÍCULOS

UNIVERSIDAD DEL WITWATERSRAND, HEATHER GAVIN, UNIVERSIDAD MERCYHURST Y PETER SCHMID, UNIVERSIDAD DE ZÚRICH; ARCHIVOS DESCARGADOS DE WWW.MORPHOSOURCE.ORG, UNIVERSIDAD DUKE (*portada*); DESY/MILDE SCIENCE COMMUNICATION (*telescopios Cherenkov*)







INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Una polémica colección de fósiles hallada recientemente en Sudáfrica ha revelado la existencia de *Homo naledi*, un nuevo miembro de la familia humana cuyas insólitas características ponen en entredicho algunas ideas muy arraigadas sobre el origen de nuestra especie. La imagen de portada muestra una reconstrucción tridimensional de su cráneo obtenida a partir de fragmentos de distintos individuos. Ilustración de Bryan Christie.



redaccion@investigacionyciencia.es



Octubre 2015 y febrero 2016

EL ÉXITO DE *HOMO SAPIENS*

En «La especie más invasora» [Investigación y Ciencia, octubre de 2015], Curtis M. Marean incluye una fantasiosa escena en la que se describe a los neandertales relatando batallas en torno a sus fogatas. Aunque dicho pasaje está claramente concebido como un recurso narrativo, sí refleja una seria omisión del artículo: entre las posibles causas que se enumeran para explicar el dominio del ser humano moderno, el autor deja fuera el habla. Y las pocas referencias que hace al lenguaje parecen implicar que el habla constituyó una facultad común a todos los grupos humanos.

No solo no hay consenso científico al respecto, sino que, basándose en varias diferencias anatómicas, algunos investigadores sostienen que fue justamente el habla lo que confirió a los humanos modernos la ventaja decisiva sobre los neandertales. De hecho, resulta difícil imaginar que el nivel de cooperación que Marean denomina «hiperprosociabilidad» y que considera clave para el éxito de *H. sapiens* haya podido darse sin ella.

Tracy Schwartz Matthews
Mountain View, California

Marean parece dar por garantizada la cuestionable idea de que el éxito del ser humano moderno puede remitirse a la elaboración de puntas de lanza cada vez mejores y a otras actividades típicamente masculinas. ¿Por qué todos los atributos supuestamente exitosos de nuestra especie deberían ser varoniles? Prácticamente cualquier aspecto relativo a la reproducción humana está determinado por las mujeres. Y, según algunos autores, la recolección puede llegar a proporcionar más proteínas que la caza. De hecho, los ricos bancos de marisco a los que Marean atribuye tanta importancia para la evolución humana tuvieron que ser recolectados, no cazados.

Adrian Verrinder
Bendigo, Australia

Responde Marean: *Estoy de acuerdo en que el complejo comportamiento hiperprosocial de nuestra especie requiere alguna forma avanzada de comunicación. Sabemos que el habla moderna tuvo que originarse hace al menos 110.000 años, ya que fue entonces cuando surgió el linaje humano superviviente más antiguo conocido (el de los grupos africanos khoisan), el cual goza de un lenguaje completamente desarrollado. Algunas estimaciones sugieren que el lenguaje podría ser tan antiguo como el ancestro común del ser humano moderno y los neandertales. Y no existe un consenso sobre que estos últimos careciesen de la maquinaria anatómica necesaria para el habla, pues las partes relevantes simplemente no se han conservado.*

Sobre la objeción al enfoque abiertamente «machocéntrico» del artículo, diré que este es una secuela de mi artículo de 2010 «Cuando el mar salvó a la humanidad» [Investigación y Ciencia, octubre de 2010], donde se enfatizaba la importancia de la recolección de plantas y de marisco para la supervivencia de nuestra especie. El registro etnográfico deja claro que, en las sociedades de cazadores-recolectores, estas dos actividades constituyen un trabajo típicamente femenino. El artículo de 2010 subrayaba la manera en que la alimentación y el ingenio común ayudaron a nuestra especie a superar una crisis climática. Este otro, en cambio, se centra en lo que ocurre cuando un grupo etnolingüístico invade el territorio de otro. Tales actos son brutales y sangrientos, y las matanzas y carnicerías que se derivan de ellos se deben a las armas y a los hombres.

¿TRÁNSITOS O MANCHAS ESTELARES?

En uno de los gráficos del artículo de Alexandra Witze «Exoplanetas: los próximos 20 años» [Investigación y Ciencia; febrero de 2016], vemos que al disminuir temporalmente el brillo de una estrella se infiere la existencia de un planeta orbitando en torno a ella. ¿Podría confundirse esa disminución de brillo con enormes manchas estelares? ¿Se han visto otras manchas estelares además de las del Sol?

Juan Manuel Pérez Rayego
Mérida, Badajoz

Responde José A. Caballero (director adjunto del proyecto CARMENES para la búsqueda de exoplanetas desde el Observatorio de Calar Alto, Almería): *El Sol es bastante tranquilo comparado con otras estrellas más jóvenes o de menor masa (más frías): en efecto, vemos enormes manchas en otras estrellas. Sin embargo, su efecto depende de la longitud de onda, con disminuciones de brillo mayores hacia el azul-ultravioleta y menores hacia el rojo-infrarrojo. En cambio, la atenuación en el brillo de una estrella provocada por un planeta que transita apenas depende de la longitud de onda. Además, un tránsito planetario tiene una forma muy característica y simétrica, por lo que, dada la precisión que los astrónomos alcanzamos hoy en día, es difícil confundir ambos efectos.*

Errata corrige

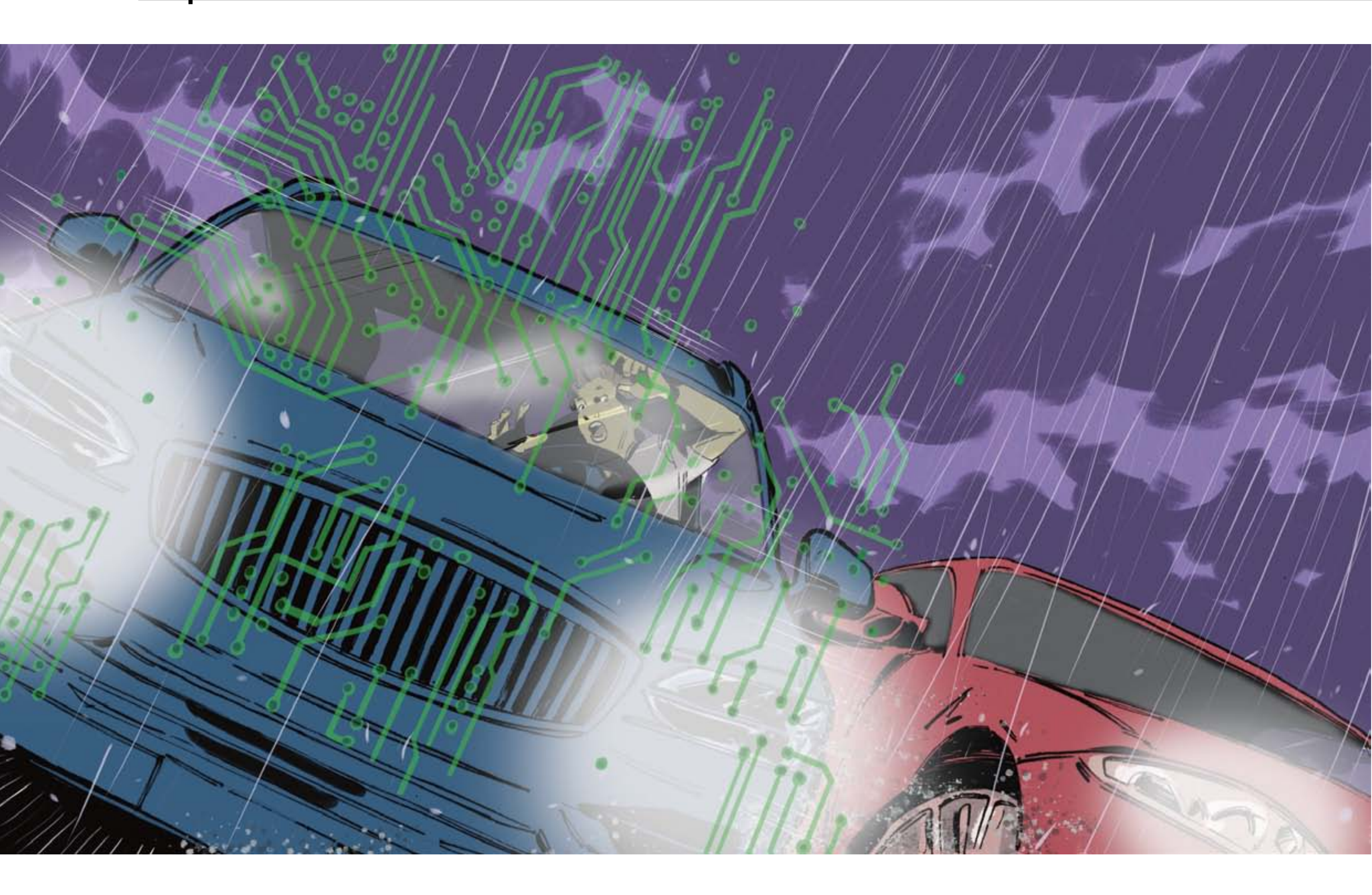
En el artículo **En busca del Planeta X**, de Michael Lemonick [Investigación y Ciencia, abril de 2016], se afirma erróneamente tanto en el texto principal como en la infografía que el objeto transneptuniano Sedna tiene un diámetro de 2250 kilómetros; su verdadero tamaño es de unos 1000 kilómetros. Por otro lado, la distancia al hipotético astro Némesis se cifra en 10.000 unidades astronómicas (UA); el valor correcto asciende a 100.000 UA.

Estos errores han sido corregidos en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



THOMAS PITILLI

TECNOLOGÍA

¿Quién cargará con las culpas cuando el conductor sea el propio coche?

Todo indica que la llegada de los vehículos autónomos impulsará a los fabricantes a asumir la responsabilidad de los accidentes de tráfico

El pasado día de San Valentín no fue idílico en Mountain's View. Por primera vez, uno de los vehículos autónomos de Google, un todocamino Lexus modificado, provocó un accidente. Tras detectar unos sacos alrededor de una alcantarilla, se pasó al carril central para evitar el peligro; tres segundos después, chocaba contra el lateral de un autobús. Según el parte del accidente, el conductor de pruebas humano vio el autobús, pero supuso que este frenaría para dejar paso al Lexus.

Aquel no fue el primer accidente en el que estaba involucrado uno de los vehículos del gigante tecnológico, pero sí el primero causado en parte por un error no humano. (Por el momento, la mayoría de los incidentes consisten en que el coche autónomo es golpeado desde detrás por un automóvil cuyo conductor se ha saltado un semáforo.) Este percance pone en primer plano una ambigüedad que se cierne sobre nuestro futuro robótico: ¿quién será el responsable —y correrá con los costes— cuando sea un vehículo autónomo el que se estrelle?

Cada vez resulta más apremiante dar con una respuesta clara a este y a otros problemas asociados a los coches sin conductor. En EE.UU., expertos y fabricantes han mostrado su preocupación por la posibilidad de que la falta de una legislación nacional impida la circulación de estos automóviles por los 50 estados del país. Para avanzar en el asunto, el Gobierno de Barack Obama ha encargado al Departamento de Transportes que este verano proponga unos criterios nacionales que regulen por completo los ensayos y las cuestiones de seguridad. Pero, en lo que respecta a la asignación de responsabilidades, puede que ya se esté fraguando una solución: los expertos sostienen que, cuando sea una máquina la que tome el volante, en la cadena de responsabilidad legal se encontrarán las compañías encargadas de la programación y del equipamiento, pero no el propietario del coche ni su compañía de seguros. Antes o después, serán los fabricantes de automóviles quienes tendrán que cargar con las culpas.

No en vano, las empresas líderes en conducción automática ya están empezando a cambiar de mentalidad. El pasado octubre, Volvo declaró que pagaría por las lesiones o daños a la propiedad que pudiera causar su IntelliSafe Autopilot, un sistema completamente autónomo cuya aparición en los coches del fabricante está

prevista para 2020. La idea que se esconde tras la decisión, explica Erik Coelingh, responsable técnico de dispositivos de seguridad y ayuda a la conducción de Volvo, es que habrá tantos sistemas redundantes y supletorios (cámaras, radares, baterías, frenos, ordenadores, actuadores para la conducción) que nunca tendrá que intervenir un conductor humano, por lo que no habrá uno culpable. «Falle el sistema que falle, el coche aún deberá tener la capacidad de detenerse por sí mismo de forma segura», señala el experto.

La actual proliferación de vehículos parcialmente automatizados muestra la velocidad a la que se avecina la situación descrita por Coelingh. Hoy, un número cada vez mayor de coches incluye sistemas de frenado para evitar choques, basados en dispositivos ópticos que detectan posibles impactos frontales y frenan por iniciativa propia. Audi, BMW y otras marcas han desarrollado automóviles que pueden aparcar solos en línea. Y este mismo año, Volvo lanzará Pilot Assist, el primer accesorio de conducción semiautónoma por carretera en EE.UU., el cual integrará en su sedán S90 de 2017. El sistema emplea un ordenador instalado en el parabrisas que, equipado con una cámara y un radar, permite aumentar y reducir la velocidad, esquivar obstáculos y mantenerse en un mismo carril a velocidades de hasta 130 kilómetros por hora.

Accesorios como Pilot Assist pertenecen a lo que Bryant Walker Smith, profesor de la Universidad de Carolina del Sur y experto en normativas tecnológicas, llama la «borrosa vía media de la automatización», donde los fabricantes todavía obligan a los conductores humanos a prestar atención. «No siempre está claro dónde cae la línea que separa al ser humano de la máquina», apunta el investigador.

Por ahora, algunas compañías intentan que el conductor humano quede claramente del lado de la línea en el que recae la responsabilidad. El sistema Super Cruise de General Motors, similar a Pilot Assist y que la compañía lanzará en 2017 en un Cadillac, vendrá acompañado de una serie de advertencias que indicarán al conductor que debe seguir atento y estar listo para tomar el control del volante cuando el tiempo cambie o la visibilidad disminuya. Con Pilot Assist, Volvo impone una obligación parecida: unos sensores táctiles en el volante garantizan que el conductor se mantiene al tanto de la situación.

No obstante, para cuando la conducción cien por cien automática se convierta en realidad, marcas como Volvo, Mercedes y Google confían en que tendrán tan dominadas estas y otras técnicas que podrán librar casi por completo al conductor tanto de la necesidad de conducir como de cualquier responsabilidad. Más aún: un estudio de 2014 de la Institución Brookings, un centro de estudios políticos y educativos radicado en Washington, concluyó que las regulaciones estadounidenses de responsabilidad civil por la fabricación de productos ya cubrirían la transición tecnológica que se avecina, por lo que es posible que el país no tenga que reescribir sus leyes para continuar con la automatización de los vehículos.

Para las compañías de automóviles, decir que correrán con todos los gastos —desde un parachoques abollado hasta los daños provocados en una colisión violenta— es una apuesta relativamente segura, ya que se espera que los coches automatizados sean más seguros que los conducidos por humanos. Según el Instituto de las Aseguradoras para la Seguridad en Carretera estadounidense, por ejemplo, el frenado automático para evitar accidentes disminuye las colisiones traseras en un 40 por ciento. Y Coelingh apunta que, según un estudio de la versión europea de Pilot Assist, el ordenador mantiene mejor la distancia de seguridad e incurre en menos frenados bruscos que los humanos.

«Desde el punto de vista de los fabricantes», concluye Smith, «puede que lo que estén considerando sea asumir una porción mayor de un pastel [el de la responsabilidad] que todos esperamos que sea mucho menor».

—Corinne Iozzio

TAXONOMÍA

El extraño monstruo fósil

Resuelto un antiguo enigma filogenético

En 1955, Francis Tully, coleccionista de fósiles aficionado, descubrió un espécimen extrañísimo en Mazon Creek, un rico yacimiento cercano a Chicago. La piedra que halló contenía los restos de un animal de forma tubular, con ojos pedunculados y un largo aparato bucal rematado con una especie de pinza dentada. Apodado el monstruo de Tully, el ejemplar de 300 millones de años de antigüedad acabó convirtiéndose en el fósil oficial del estado de Illinois. A pesar de su popularidad, hasta hoy había sido un quebradero de cabeza para los especialistas.

Según los resultados publicados en *Nature*, el organismo sería un predecesor de las lampreas actuales, unos peces sin mandíbulas (agnatos) y hematófagos. Los expertos han llegado a esta conclusión tras analizar 1200 muestras del monstruo (la mayoría, de unos 15 a 20 centímetros de largo) y reparar en que lo que suponían parte del intestino ha resultado ser en realidad la notocorda, una primitiva espina dorsal. La curvatura descendente de la notocorda encauzó al equipo hacia las lampreas, que también comparten esa rareza fisiológica.

Pese a todo, Victoria McCoy, paleontóloga de la Universidad de Leicester que encabezó el estudio mientras se hallaba en la Universidad Yale, no cree posible cerrar el caso. «Aún sabemos muy poco sobre el modo de vida del monstruo de Tully», confiesa. «Pero ahora podemos tomar las lampreas modernas y otros peces como análogos y esperamos comenzar a desentrañar las misteriosas costumbres de este monstruo primitivo.»

—Rachel Nuwer



CORTESÍA DE SEAN McMAHON, UNIVERSIDAD YALE

ASTROFÍSICA

Baile de agujeros negros

Las propiedades orbitales de un sistema binario de agujeros negros supermasivos permiten inferir la tasa a la que uno de ellos gira sobre sí mismo

Los agujeros negros son objetos muy masivos, pero también muy compactos, lo que dificulta su estudio a través de las grandes distancias cósmicas. Como consecuencia, los investigadores deben ingeniar todo tipo de trucos para medir sus propiedades. Ahora, un equipo internacional de astrónomos ha ideado uno nuevo. En un artículo publicado el pasado mes de marzo en *The Astrophysical Journal Letters*, los investigadores explican cómo medir la tasa a la que un agujero negro rota sobre sí mismo a partir de su interacción con otro que orbita en sus proximidades.



RECREACIÓN ARTÍSTICA de un agujero negro supermasivo.

OJ 287 es un sistema binario de agujeros negros supermasivos situados a 3500 millones de años luz de la Tierra. Se calcula que la masa del mayor de ellos asciende a unos 18.000 millones de masas solares, mientras que la del segundo apenas alcanzaría los 150 millones. Debido a esa disparidad entre sus masas, el más pequeño sigue una órbita que, en ocasiones, atraviesa el disco de materia caliente que se arremolina en torno al primero. Tales «estallidos», que se suceden en una órbita de 12 años de duración, se manifiestan como un cambio en la luz visible emitida por el sistema, generada en su mayor parte por el material calentado a altas temperaturas.

La capacidad para predecir ese fenómeno, así como la precesión de la órbita elíptica del agujero negro menor, permitió a los astrónomos prepararse para dos estallidos que debían tener lugar en noviembre y diciembre de 2015. Al medir de forma precisa la variación de la luz irradiada por el sistema durante esos eventos, los investigadores lograron inferir la tasa a la que el mayor de los agujeros negros rota sobre sí mismo: el 31 por ciento del máximo permitido por la relatividad general.

Junto con otras observaciones anteriores, los datos indican que el período orbital de este sistema binario se va acortando con el tiempo. Dicho fenómeno obedece a la radiación de ondas gravitacionales: ondulaciones del espaciotiempo cuya emisión drena energía del sistema, por lo que las órbitas de ambos objetos se contraen. En otras palabras, en OJ 287, los astrónomos están asistiendo a la fusión gradual de dos agujeros negros supermasivos.

—Caleb Scharf

PSICOLOGÍA

¿Debemos fiarnos de la inspiración?

Nuevas investigaciones revelan que las ideas súbitas suelen ser correctas



Los momentos de inspiración son gratificantes porque parecen muy acertados; se diría que todas las piezas del rompecabezas encajan sin esfuerzo. Pero ¿puede uno fiarse de esas soluciones súbitas? Según una nueva investigación publicada en *Thinking & Reasoning*, sí. Los resultados avalan la opinión arraigada de que ese tipo de ideas brindan respuestas acertadas a problemas difíciles.

En cuatro experimentos, Carola Salvi, investigadora posdoctoral de la Universidad Noroccidental, John Kounios, psicólogo de la Universidad Drexel, y sus colaboradores presentaron a estudiantes universitarios pruebas de ingenio, como anagramas y jeroglíficos. Al término del tiempo cronometrado, se les preguntó a los probandos si habían llegado a la respuesta dando vueltas al problema y procediendo paso a paso (resolución analítica) o si la solución les había venido a la mente de repente (inspiración).

En los cuatro experimentos, las soluciones «¡eureka!» eran más correctas que las resultantes del razonamiento deliberado. De este modo, en uno de los experimentos en que se pidió a 38 participantes que pensaran en una sola palabra con la que componer una frase con otras tres palabras indicadas previamente (como «manzana» y el trío «cangrejo», «pino» y «salsa»), las soluciones intuitivas fueron acertadas en el 94 por ciento de las ocasiones, en comparación con el 78 por ciento de las soluciones analíticas.

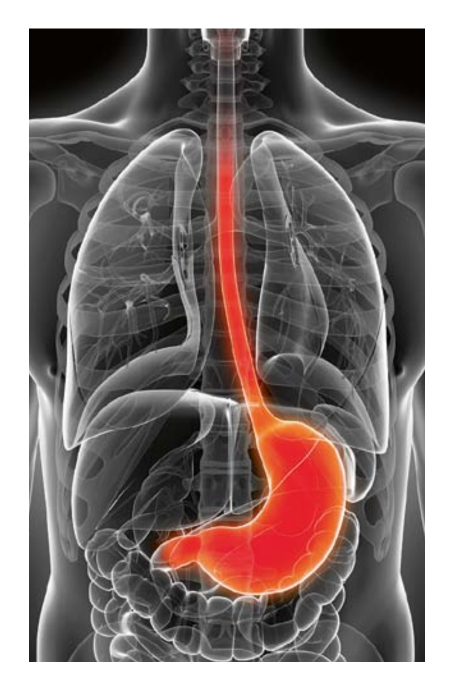
Este resultado podría explicarse por el modo en que el cerebro genera las ideas. Como el proceso ocurre en su mayor parte sin que el individuo sea consciente de ello, parece ser un lance a todo o nada: la solución plena viene a la mente o no. La hipótesis la refrendan los electroencefalogramas y las resonancias magnéticas funcionales; en estudios anteriores, estas pruebas revelaron que, justo antes de que la idea inspiradora acuda a la mente, la corteza occipital, la responsable del procesamiento visual, se «apaga» momentáneamente o «parpadea», de modo que las ideas parecen surgir de la nada, afirma Kounios. Por eso es menos probable que sean incorrectas. El pensamiento analítico, en cambio, sucede conscientemente y, por lo tanto, está más sometido a las prisas y a los lapsus en el razonamiento.

Ello no significa que la inspiración constituya siempre la mejor estrategia. Los experimentos de Salvi y Kounios plantean rompecabezas cuyas respuestas, correctas o no, son inequívocas. Así que los resultados no siempre son extrapolables a las situaciones cotidianas, donde los problemas suelen ser sumamente complejos y requieren días, meses o años para hallar una solución.

De hecho, las preguntas difíciles exigen a menudo varias estrategias distintas para llegar a una solución, afirma Janet Metcalfe, responsable del Laboratorio de Metacognición y Memoria de la Universidad de Columbia. La experta, que no participó en el estudio, añade: «No siempre hay una solución perfecta para cada problema».

—Roni Jacobson

CORTESÍA DE NASA/JPL/CALTECH (*agujero negro*); THOMAS FUCHS (*inspiración*)



LA ACIDEZ GÁSTRICA es una sensación de ardor que surge cuando el ácido del estómago asciende hacia el esófago.

SALUD

Los fármacos contra la acidez alteran el intestino

Los antiácidos reducen la variedad de bacterias intestinales, lo que puede ocasionar trastornos médicos

En el año 2014 se prescribieron en EE.UU. más de 170 millones de unos antiácidos conocidos como inhibidores de la bomba de protones (IBP) para tratar cuadros gástricos como la dispepsia, la úlcera péptica o el reflujo gastroesofágico. Son uno de los diez medicamentos más recetados del país. Además, está permitida su venta sin receta médica. Las encuestas indican que se abusa de estos medicamentos, en cuyo caso pueden resultar más perjudiciales que beneficiosos. Los IBP alteran el microbioma intestinal, lo que aumenta el riesgo de algunas infecciones intestinales, según dos estudios recientes. Ello viene a respaldar las ya crecientes pruebas acerca de los efectos adversos de estos fármacos.

Para esclarecer este punto, investigadores de la Universidad de Groninga y del Centro Médico Universitario de Maastricht, así como del Instituto Broad de la Universidad Harvard y del Instituto de Tecnología de Massachusetts, secuenciaron el ADN bacteriano de las heces de 1815 personas para describir su microbioma intestinal. Al comparar los perfiles de los sujetos que sí tomaban IBP frente a los que no, demostraron que los primeros presentaban una menor diversidad bacteriana intestinal.

El equipo, que publicó sus hallazgos en la revista *Gut*, describió que esas diferencias parecían asociarse al consumo del fármaco y no a la enfermedad subyacente, ya que los cambios en el microbioma intestinal existían aun cuando los sujetos tomaran IBP en ausencia de patología gastrointestinal. (Los IBP se administran a los pacientes de unidades de cuidados intensivos para prevenir las úlceras por estrés, entre otros usos.)

Investigadores del Colegio King de Londres y de las universidades Cornell y de Columbia corroboraron estos resultados en un estudio similar, así como en un pequeño ensayo en el que analizaron el microbioma intestinal antes y después del uso de IBP durante un período de cuatro a ocho semanas.

Los IBP reducen la diversidad bacteriana al alterar la acidez intestinal. Como consecuencia, se produce un cambio en el microambiente que favorece el crecimiento de unas cepas microbianas frente a otras, un desequilibrio que puede dar lugar a una infección, según Rinse Weersma, gastroenterólogo de la Universidad de Groninga. Esa alteración en el microbioma ofrece la oportunidad de desarrollarse a bacterias como *Salmonella* o *Clostridium difficile*.

El microbioma humano también influye en la capacidad de absorción intestinal de calcio y otros minerales y vitaminas. Ello podría explicar por qué las personas que toman IBP tienen un mayor riesgo de sufrir determinadas fracturas o de padecer carencias nutricionales. No se sabe aún cuán preocupados deben estar los consumidores crónicos de estos fármacos. Según Joel Heidelbaugh, médico de cabecera de la Universidad de Michigan que estudia el tema, debería haber un mayor seguimiento médico de estos pacientes. Hay miles de personas que consumen IBP sin existir un motivo médico para ello.

—Melinda Wenner Moyer



MEDIOAMBIENTE

La segunda vida del bosque

Si se le concede la oportunidad de regenerarse, la selva arrasada puede albergar casi tanta vida como la virgen

Los conservacionistas que luchan por salvar la selva tropical suelen volcar sus esfuerzos en los reductos prístinos, los cada vez más escasos terrenos en que el zumbido de las motosierras es un eco lejano. Pero merece la pena proteger hasta los terrenos cortados a matarrasa. Cada vez más datos muestran que, en las circunstancias adecuadas, las parcelas que han sufrido una tala intensa pueden rebrotar y albergar casi tanta biodiversidad como la Amazonia virgen.

Un estudio publicado en marzo en *Tropical Conservation Science* ofrece la última mirada al valor biológico de los llamados bosques secundarios. Un equipo internacional de ecólogos y voluntarios ha dedicado un año y medio a clasificar cada ave, anfibio, reptil y mamífero de mediana o gran talla que han hallado en 800 hectáreas en recuperación en el Parque Nacional del Manu, en Perú, catalogado como reserva de la biosfera por la UNESCO. El censo definitivo de 570 especies supone un 87 por ciento de las conocidas en los bosques vírgenes vecinos, entre ellas fauna amenazada como el perro de monte (*Atelocynus microtis*) y el armadillo gigante (*Priodontes maximus*). El equipo descubrió incluso la que podría ser una nueva especie de rana.

El estudio del Manu representa un ejemplo de manual de la biodiversidad en un bosque secundario, afirma Andrew Whitworth, de la Universidad de Glasgow, que llevó a cabo el trabajo en colaboración con la peruana Fundación Crees. El éxito probablemente se explica porque la caza y la tala están prohibidas desde hace tiempo en el parque, y la fauna puede adentrarse en él sin dificultad desde las extensas zonas intactas cercanas.

Pero incluso las tierras gravemente devastadas que apenas han iniciado el proceso de recuperación aportan multitud de beneficios ambientales, como la conservación de las vertientes y el servir de corredores para la fauna. Los bosques secundarios reducen asimismo la contaminación por dióxido de carbono: el pasado febrero se informó de que los bosques tropicales regenerados absorben hasta 11 veces más carbono atmosférico que los inalterados (porque estos últimos ya están al borde de su máxima capacidad de retención).

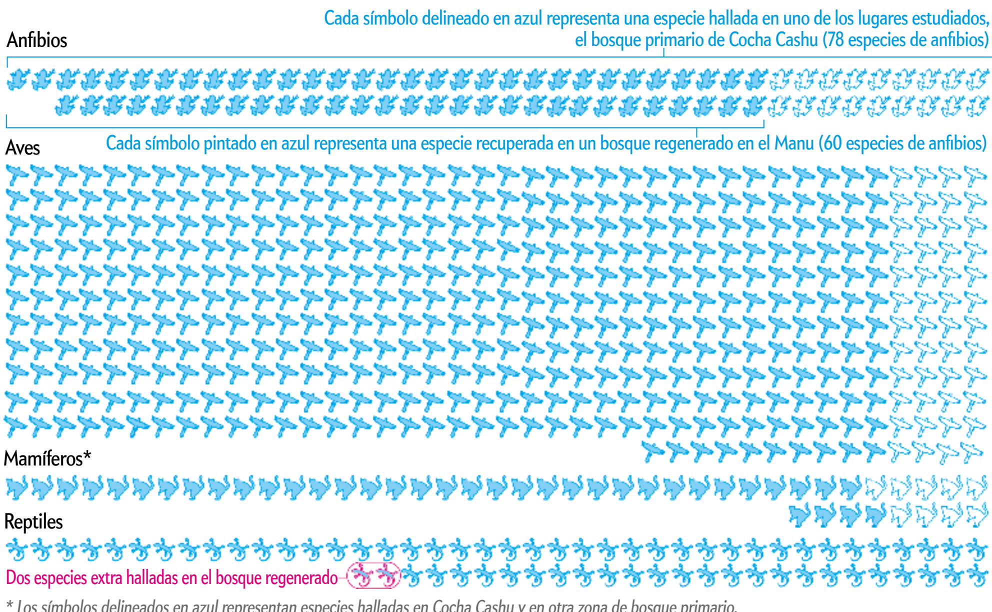
«No estamos diciendo en ningún momento que sean más importantes que el bosque primario», matiza Whitworth. «Sin embargo, con una buena protección y tiempo para regenerarse, los bosques secundarios pueden convertirse en un recurso muy valioso.» De forma ingeniosa, Robin Chazdon, profesor de ecología en la Universidad de Connecticut, y sus colaboradores han comparado en un artículo el bosque regenerado con un buen vino de Burdeos, pues ambos mejoran con la edad.



Hasta ahora, las parcelas taladas de los trópicos solían convertirse en plantaciones de palma de aceite o en otros cultivos, sin valorar en nada el potencial de reforestación (*arriba*). Pero ahora se comienza a prestar atención al problema. En la cumbre del clima celebrada en 2014 en Nueva York bajo el auspicio de la ONU, varias docenas de los principales Gobiernos del mundo, empresas multinacionales, organizaciones sin ánimo de lucro y grupos indígenas se comprometieron a restaurar 350 millones de hectáreas de bosque degradado hasta 2030. «No podemos limitarnos a salvaguardar los bosques primigenios», advierte Chazdon, que está asesorando a Brasil sobre cómo revitalizar su diezmado bosque atlántico. «Con eso no bastará.»

—*Jesse Greenspan*

Biodiversidad: ¿Cómo prospera la selva regenerada?



** Los símbolos delineados en azul representan especies halladas en Cocha Cashu y en otra zona de bosque primario.*

FUENTE: «HOW MUCH POTENTIAL BIODIVERSITY AND CONSERVATION VALUE CAN A REGENERATING RAINFOREST PROVIDE?A 'BEST-CASE SCENARIO' APPROACH FROM THE PERUVIAN AMAZON», POR ANDREW WHITWORTH ET AL., EN *TROPICAL CONSERVATION SCIENCE*, VOL. 9, N.O 1; MARZO DE 2016; AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*); CORTESÍA DE ANDREW WHITWORTH (*bosque*)

MEDICINA

Un mejor diagnóstico de la tuberculosis

Una nueva prueba para detectar la enfermedad podría salvar millones de vidas

Casi una tercera parte de la población mundial está infectada por la bacteria que causa la tuberculosis, una enfermedad que afecta principalmente a los pulmones y se caracteriza por astenia, fiebre, tos y dolor torácico. Según los últimos datos disponibles, en 2014 se diagnosticaron 9,6 millones de nuevos casos, y ese mismo año fallecieron 1,5 millones de enfermos de tuberculosis. Es crucial disponer de un método diagnóstico sencillo, barato y preciso. La prueba de referencia que se usa en la actualidad no cumple tales criterios. Una nueva técnica hematológica podría frenar de forma notable esta epidemia.

El diagnóstico actual se basa en la detección de ADN bacteriano en el esputo. Pero este resulta difícil de obtener en algunos niños, que no saben expectorar a demanda. La prueba puede pasar por alto la enfermedad en pacientes coinfectados por VIH, ya que en ellos las bacterias de la tuberculosis pueden estar muy mermadas en número o encontrarse en localizaciones extrapulmonares. Además, su coste de hasta 10 dólares resulta prohibitivo en los países en vías de desarrollo. Por todo ello, un porcentaje amplio de casos quedan sin diagnosticar o el diagnóstico es tardío, lo que implica dejar infecciones serias sin tratar con el consiguiente riesgo de propagación.

Hace dos años, la Organización Mundial de la Salud hizo un llamamiento a la comunidad científica para buscar una mejor herramienta diagnóstica. Fue Purvesh Khatri, profesor médico de la Universidad Stanford, y sus colaboradores quienes encontraron tres genes dentro del genoma humano que distinguen la tuberculosis activa de otras enfermedades y desarrollaron la manera de detectarlos en sangre.

La técnica es sensible por igual en pacientes con y sin coinfección por VIH y logró identificar la enfermedad en el 86 por ciento de los pacientes pediátricos, según los resultados de su estudio, publicados en la revista *Lancet Respiratory Medicine*. Además, las muestras de sangre se pueden obtener de forma fácil en un consultorio y ofrecen resultados el mismo día, a diferencia del análisis del esputo. Esto es fundamental en los países en vías de desarrollo, donde acudir a una sola cita médica puede resultar una tarea ardua. «Es prioritario poder comenzar el tratamiento de forma inmediata», afirma Sheela Shenoi, profesora de medicina en la Universidad Yale especializada en sida.



LA TUBERCULOSIS afecta sobre todo a los países en desarrollo, como Bangladés, donde 640.000 personas sufrían la enfermedad en 2014.

A la espera de que pueda emplearse para el diagnóstico de casos nuevos y que se extienda su uso, Khatri ha patentado la prueba. Cree que podría costar menos de la mitad de lo que cuesta la que se emplea en la actualidad. «Si el estudio de estos tres genes pudiera convertirse en una prueba de referencia, revolucionaría el diagnóstico de la tuberculosis», afirma Shenoi. —*Jessica Wapner*

TECNOLOGÍA

¿Atento o distraído?

Los ordenadores ya pueden saber cuándo el usuario se está aburriendo

El aburrimiento se exterioriza a través de algo más que bostezos y miradas vidriosas. Otras pistas corporales más sutiles, llamadas movimientos no instrumentales —como rascarse, cambiar con frecuencia la postura de las piernas o tamborilear los dedos—, también delatan el estado mental de una persona. Y, a semejanza de los profesores y aquellas personas habituadas a hablar en público, también las máquinas pueden captar esos signos delatores. Un nuevo estudio ha revelado que quienes usan un ordenador se mueven menos cuando prestan atención al contenido de la pantalla... y ya hay algoritmos capaces de aprovechar esa información para deducir en tiempo real si el usuario se está distrayendo.

Para medir la atención prestada, Harry Witchel, psicobiólogo de la Escuela de Medicina de Brighton y Sussex, y sus colaboradores equiparon a 27 participantes con indicadores de movimiento que un sistema informático podía seguir. Los sujetos leyeron en una pantalla fragmentos de la novela *El curioso incidente del perro a medianoche*, de Mark Haddon, así como extractos de las normativas de la Autoridad Bancaria Europea. A partir del movimiento de la cabeza, el torso y las piernas, el ordenador averiguó en qué momento se distraían. Y, en efecto, el análisis reveló que, cuando leían la novela, se movían casi un 50 por ciento menos que al ojear las directrices bancarias.

El sistema, descrito en *Frontiers in Psychology*, se suma a un volumen creciente de datos sobre la llamada «tecnología perceptiva», explica Nadia Berthouze, informática del Colegio Universitario de Londres. Una vez perfeccionada esta técnica, Witchel cree que los educadores podrán emplearla para reconocer en qué momento mengua la atención de los estudiantes y reaccionar con estrategias que permitan recuperarla. Además, el método también ayudaría a construir robots emocionalmente más afines a las personas.



—*Rachel Nuwer*

PROBAL RASHID, GETTY IMAGES (*tuberculosis*); THOMAS FUCHS (*ordenador*)



UN ESTUDIO RECIENTE ha aclarado por qué el parámetro que parece gobernar el punto de fractura de un árbol durante una tormenta es la velocidad del viento, con independencia de la altura y el grosor de la planta.

FÍSICA

Mecánica arbórea

Un estudio analiza el comportamiento crítico que parece regir la fractura de los árboles durante una tormenta

En 2009, después de que una tormenta especialmente violenta apodada Klaus golpease el sudoeste de Francia, los investigadores se percataron de un fenómeno muy curioso: casi todos los árboles azotados por vientos de 150 kilómetros por hora o más se troncharon, con independencia de su especie, altura o diámetro. En cambio, la mayoría de los que sufrieron ráfagas menos intensas quedaron intactos. ¿Marcaba esa velocidad del viento el umbral de la destrucción?

Para averiguarlo, el físico Christophe Clanet y sus colaboradores de la Escuela Politécnica de Francia y la Escuela Superior de Física y Química Industriales de París decidieron quebrar en condiciones controladas múltiples varillas de madera de haya de diversas longitudes y diámetros. Para ello, insertaron un extremo de cada una en un agujero del mismo diámetro abierto en un bloque de acero y, poco a poco, fueron ejerciendo más fuerza sobre el extremo opuesto, con lo que la varilla se doblaba hasta romperse. Los investigadores midieron la curvatura crítica a la que se partía la madera e introdujeron los valores correspondientes en las ecuaciones que gobiernan el proceso de fractura para determinar una velocidad del viento equivalente. Su resultado coincidió con lo observado en 2009: la velocidad calculada a la que se rompían las varillas ascendía, con independencia de su tamaño, a unos 150 kilómetros por hora. El trabajo apareció publicado el pasado mes de febrero en *Physical Review E*.

¿Cómo explicar ese valor constante? El resultado parece obedecer a una combinación de leyes físicas y evolución. Aunque las matemáticas del problema predicen que la velocidad del viento a la que se quiebra un árbol sí debería depender de su altura y su diámetro, la naturaleza no hace árboles que sean a la vez delgados y altos: en general, los árboles bajos son finos, y los altos, gruesos. Además, los más voluminosos suelen exhibir defectos mayores —como nudos, por ejemplo—, donde se concentra la tensión cuando el árbol se dobla.

Esa combinación de defectos, longitud y diámetro hace que todas estas características se anulen entre sí, por lo que, al final, el parámetro que determina la fractura es la velocidad del viento. Así pues, aunque un árbol bajo tenga menores puntos de tensión en los que troncharse, será también más delgado y podrá partirse con mayor facilidad. Y a la inversa: un árbol alto poseerá grosor y rigidez, pero también mayores defectos internos, por lo que podrá romperse por más sitios.

El hallazgo es notable por su simplicidad: una sola ecuación para entender la mecánica arbórea. Otros expertos, sin embargo, recelan justamente de esa sencillez. Lee Frelich, director del Centro de Ecología Forestal de la Universidad de Minnesota, sostiene que modelizar un árbol como un cilindro implica pasar por alto los efectos aerodinámicos que el viento ejerce sobre las ramas, lo que a su vez cambia la relación entre la fuerza que experimenta el tronco y la velocidad del viento. Así pues, el montaje experimental de los investigadores no reflejaría las complejas interacciones entre efectos físicos, biológicos y meteorológicos existentes en el mundo real. Con todo, Clanet y sus colaboradores consideran útiles sus resultados. Ahora tienen pensado estudiar si las ráfagas de viento —en lugar de un viento con velocidad constante, como en el experimento— modificarían el punto de ruptura.

—Tim Palucka

DAVID R. FRAZIER, SCIENCE SOURCE

ARQUEOLOGÍA

La Ruta de la Seda sube a la montaña

Un estudio halla indicios de un ramal tibetano del legendario itinerario comercial

Se cree que la Ruta de la Seda, famosa por el extraordinario intercambio cultural y de bienes que propició entre Oriente y Occidente, deambulaba en grandes tramos horizontales por las laderas montañosas y las tierras bajas del desierto del Gobi. No obstante, varias pruebas halladas recientemente en una lujosa tumba apuntan a que, a través de un ramal hasta ahora desconocido, el célebre camino también se habría aventurado en las grandes altitudes del Tíbet.

En 2005, unos monjes descubrieron una tumba de 1800 años de antigüedad a 4300 metros de altitud en el distrito tibetano de Ngari. Cuando comenzaron las excavaciones, en 2012, los investigadores se sorprendieron al encontrar un gran número de artículos típicamente chinos. Los objetos sugieren que los mercaderes habrían viajado de China al Tíbet por una ramificación de la Ruta de la Seda de la que no existían registros históricos.

«Se trata de un descubrimiento asombroso», asegura Houyuan Lu, arqueobotánico del Instituto de Geología y Geofísica de la Academia de Ciencias China. Entre otros elementos, los investigadores encontraron bellas piezas de seda bordadas con los caracteres chinos *wang hou* («rey» y «príncipes»), una máscara de oro puro y vasijas de cerámica y de bronce.

Pero los expertos también quedaron atónitos al hallar lo que parecían ser yemas de té. La presencia de esta planta en el Tíbet no estaba documentada hasta el siglo VII de nuestra era, pero aquellas yemas eran entre 400 y 500 años más antiguas. Lu y su equipo analizaron las muestras y detectaron grandes cantidades de cafeína y teanina, un aminoácido abundante en el té. El análisis químico reveló, además, que los residuos eran similares a los hallados en la tumba de un emperador chino de la dinastía Han que gobernó hace 2100 años, y que ambas plantas podían asociarse a las variedades de té cultivadas en Yunnan, en el sur de China. «Ello sugiere con fuerza que el té [de la tumba tibetana] provenía de China», explica Lu. Los resultados aparecieron publicados el pasado mes de enero en la revista *Scientific Reports*.

Según Martin Jones, arqueobotánico de la Universidad de Cambridge, la existencia de tales vínculos entre el Tíbet y China apunta a la existencia de un ramal tibetano de la Ruta de la Seda que hasta ahora habría pasado inadvertido para los investigadores. El hallazgo se enmarca en una nueva forma de ver el famoso itinerario (clausurado por el Imperio otomano en el siglo XV), según la cual este habría conformado una verdadera red tridimensional que no solo recorría distancias lineales, sino que también escalaba altas montañas.

Otros estudios también han aportado indicios de que, tres milenios antes de nuestra era, el comercio en Asia ya se practicaba a través de rutas montañosas, hoy conocidas como corredores montañosos del Asia interior. «Esto indica que las montañas no son una barrera», señala Rowan Flad, arqueólogo de Harvard. «Pueden ser canales eficientes para el intercambio de culturas, ideas y técnicas.»

—*Jane Qiu*



FUENTE: «EARLIEST TEA AS EVIDENCE FOR ONE BRANCH OF THE SILK ROAD ACROSS THE TIBETAN PLATEAU», POR HOUYUAN LU ET AL. EN *SCIENTIFIC REPORTS*, VOL. 6, ART. 18955, 7 DE ENERO DE 2016; MAPPING SPECIALISTS (*mapa*); ETSI CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE MADRID (*transbordador*)

AGENDA

CONFERENCIAS

5 de mayo
Hablemos del sistema solar: Los otros mundos del vecindario
Francisco Javier Gálvez Fernández, Observatorio Astronómico del Torcal
Ciclo «Cita con las estrellas»
Sala de Ámbito Cultural de El Corte Inglés
Málaga
www.astromalaga.es > noticias

12 y 26 de mayo - Ciclo
Antropoceno: La revolución silenciosa
Fundación Tatiana Pérez de Guzmán el Bueno
Madrid
www.fundaciontatianapgb.org/actualidad

EXPOSICIONES

Hasta el 6 de mayo
Centenario del Transbordador del Niágara
Año Torres Quevedo 2016
ETSI Caminos, Canales y Puertos
Madrid
www1.caminos.upm.es/blog > exposiciones



OTROS

4 de mayo - Mesa redonda
Mentes lúcidas y longevas
Adolf Tobeña, Universidad Autónoma de Barcelona
Ciclo «Divulgar en la calle»
Librería Documenta
Barcelona
www.uab.cat > sala de prensa

23, 24 y 25 de mayo - Festival
Pint of Science
Charlas científicas en bares
Más de 20 ciudades españolas
pintofscience.es

26 de mayo - Charlas
Programa Naukas en Kausal 2016
Sesiones divulgativas sobre seguridad alimentaria
Palacio de Congresos Europa
Vitoria
www.kausal.eus > programa > naukas

METROLOGÍA

El problema de la constante de la gravitación universal

Los distintos experimentos para determinar esta constante fundamental de la naturaleza arrojan valores incompatibles entre sí. En los próximos años, los expertos intentarán zanjar la cuestión

TERRY QUINN

En los últimos años se han efectuado ocho mediciones de la constante de la gravitación universal, también conocida como *G* o como constante de Newton. Aunque casi todos los resultados han arrojado incertidumbres de unas 20 partes por millón (ppm), el conjunto de valores presenta una dispersión de 400 ppm. En dos encuentros celebrados en 2014, uno en la Real Sociedad británica y otro en el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) estadounidense, se acordó una propuesta para resolver este incómodo problema. Pero antes, comencemos recordando su historia.

Henry Cavendish fue el primero que logró medir la atracción gravitatoria entre dos masas de laboratorio. En su célebre trabajo de 1798, demostró cómo usar una balanza de torsión para «pesar la Tierra» o, como diríamos hoy, determinar el valor de *G*. (La constante de acoplamiento *G* no fue introducida explícitamente hasta finales del siglo XIX.) Cavendish era un magnífico experimentador: hoy se estima que su resultado apenas se desvió un 1 por ciento del valor real. Desde entonces, la mayoría de las mediciones de *G* se han llevado a cabo con balanzas de torsión, ya que estas proporcionan un desacoplamiento casi perfecto entre el peso de las masas y la diminuta atracción gravitatoria horizontal que estas se ejercen entre sí (un factor que supera con facilidad la cantidad de 10^9).

En 1986, en su evaluación de las constantes fundamentales de la naturaleza, el Comité de Datos para la Ciencia y la Tecnología (CODATA) cifró la incertidumbre de *G* en 14 ppm, para lo cual empleó como base un valor obtenido en 1982 por la Oficina Nacional de Estándares estadounidense (el NIST actual). Sin embargo, en 1995 la Institución Federal Físico-Técnica Alemana (PTB, el instituto nacional de metrología del país) publicó un nuevo valor que, con una incertidumbre inferior a 100 ppm, se alejaba en un pasmoso 0,64 por ciento del establecido por el CODATA.

Para cuando se descubrió el error en el resultado del PTB, ya había comenzado una febril actividad para determinar el verdadero valor de *G*. La mayoría de los métodos se basaban en balanzas de torsión de diferentes diseños, incluida una enfriada a la temperatura del helio líquido.

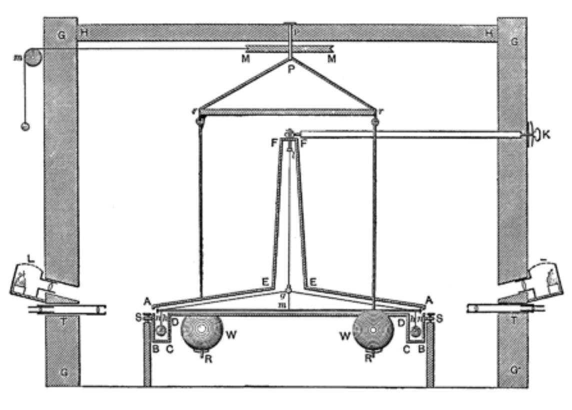


DIAGRAMA de la balanza de torsión empleada en 1798 por Henry Cavendish para medir la atracción gravitatoria entre dos masas de laboratorio.

Otros emplearon péndulos suspendidos, una versión de laboratorio de un método concebido por Cavendish pero llevado a la práctica en 1774 por Nevil Maskelyne, quien midió la desviación con respecto a la vertical de un péndulo colgante cerca del monte Schiehallion, en Escocia. Otro experimento determinó la diferencia en el peso de una masa patrón situada justo debajo y justo encima de 13 toneladas de mercurio. Por último, una técnica reciente, basada en interferometría de átomos que caen en un campo gravitatorio conocido, aún no ha alcanzado el nivel de precisión de los intentos precedentes.

En el encuentro celebrado en el NIST en 2014 se acordó, como primer paso, repetir en diferentes laboratorios dos mediciones recientes: una efectuada en el Instituto Conjunto para la Astrofísica de Laboratorio (JIFA), en EE.UU., y otra realizada en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), en Francia, las cuales quedaban, respectivamente, unas 200 ppm por debajo y por encima del valor medio. El montaje experimental de ambas aún se encuentra disponible, y el de la BIPM será transferido al NIST este mismo año.

Desde un punto de vista más amplio, la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada ha creado un grupo de trabajo sobre *G*, mientras que el Comité Internacional de Pesos y Medidas ha instaurado un consorcio de institutos metrológicos nacionales para analizar la cuestión. Hace poco, la Fundación Nacional para la Ciencia estadounidense lanzó una convocatoria de propuestas para medir esta constante, con una promesa de financiación de entre uno y dos millones de dólares. El anuncio incluía la frase «No se requiere experiencia». Los más cínicos de entre quienes realmente hemos medido el valor de *G* tal vez habríamos añadido que la experiencia necesaria se adquiere durante los diez primeros años.

Hoy, el valor recomendado para *G* es de $6{,}67408 \pm 0{,}00031 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{kg^{-1}\ m^3\ s^{-2}}$. ¿Quién necesita un valor más preciso que este? La respuesta corta es, por el momento, nadie. Sin embargo, esta aparente incapacidad para converger al mismo valor de *G* socava nuestra confianza en la metrología de fuerzas pequeñas. Aunque es cierto que las órbitas de los planetas dependen del producto de *G* y la masa del Sol, y que la estructura de todo objeto astrofísico queda determinada por el equilibrio entre la gravedad y otras fuerzas (como las producidas por el gas, los fotones o la presión de degeneración), a los modelos del Sol obtenidos a partir de primeros principios aún les queda un orden de magnitud para predecir el valor de *G* con una precisión equiparable a la lograda en los experimentos de laboratorio. Tampoco es necesario

conocer el valor de esta constante para medir posibles desviaciones en la ley del inverso del cuadrado de la distancia o en el principio de equivalencia, y aún carecemos de una teoría cuántica de la gravedad que prediga un valor de *G* que pueda comprobarse en un experimento.

¿Esconden estas discrepancias en el valor de *G* algún efecto físico desconocido? No parece muy probable. En mi opinión, el desacuerdo se debe a la existencia de errores sistemáticos aún por descubrir en todos o en algunos de estos experimentos. Medir *G* es difícil, pero ¡no debería serlo tanto!

—Terry Quinn
Director emérito de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas
Sèvres

Artículo original publicado en *Nature Physics*, vol. 12, pág. 196, 2016.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2016

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

The 1986 adjustment of the fundamental physical constants. E. R. Cohen y B. N. Taylor en *Reviews of Modern Physics*, vol. 59, págs. 1121-1148, octubre de 1987.
Outcome of the Royal Society meeting on *G* held at Chicheley Hall on 27 and 28 February 2014 to discuss "The Newtonian constant of gravitation, a constant too difficult to measure?". T. Quinn en *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 372, art. n.º 20140286, septiembre de 2014.
The search for Newton's constant. C. Speake y T. Quinn en *Physics Today*, vol. 67, págs. 27-33, julio de 2014.

COMUNICACIÓN DE LA CIENCIA

La inocencia de pulsar un botón

Una mirada histórica y crítica a los orígenes de la interactividad en los museos de ciencia

JAUME SASTRE JUAN

El 11 de febrero de 1936, Albert Einstein participó en la reinauguración del Museo de Ciencia e Industria de Nueva York en el Centro Rockefeller. Algunos días más tarde, el *New York Times* ilustró su crónica del evento con una fotografía del famoso físico alemán manipulando uno de los muchos dispositivos accionables por los visitantes, que convertían el museo neoyorquino en un hervidero de niños y adultos revoloteando de botón en botón. Pulsar uno de ellos en un museo de ciencia parece un gesto banal. Y más, si cabe, en estos tiempos en que nuestra relación con el mundo está cada vez más mediada por un sinfín de botones que configuran la textura de lo real, desde los electrodomésticos a los móviles de última generación. Sin embargo, observado bajo el prisma de la historia, el gesto de Einstein, y de millones de visitantes de museos y centros de ciencia desde entonces, gana en complejidad y pierde en inocencia. La celebración del Día Internacional de los Museos el 18 de mayo es una buena ocasión para dirigir la mirada al pasado con el objetivo de descifrar mejor el presente.

Los primeros museos: «Prohibido tocar»

En su influyente análisis sobre el nacimiento del museo como forma cultural, el historiador Tony Bennett parte de dos constataciones simples pero en absoluto triviales. La primera es que no siempre ha habido museos. Como cualquier otra institución social, los museos nacen en un determinado contexto histórico y responden a una configuración particular de intereses políticos y representaciones simbólicas. La segunda es que visitar un museo es algo que hacemos básicamente con el cuerpo y los sentidos: paseamos por las salas, nos detenemos a leer un panel, observamos un objeto, pulsamos un botón. Conectando estas dos intuiciones, Bennett analiza los museos burgueses decimonónicos como instrumentos de control social orientados a disciplinar los cuerpos y las costumbres de la población a través de un entrenamiento en lo que denomina la «mirada cívica».

Según Bennett, la intención de los promotores de los primeros museos era elevar moralmente a las clases trabajadoras mediante el contacto con los cuerpos, los modales y los mundos simbólicos de la burguesía. En el museo, uno tenía que aprender a comportarse. De ahí el «prohibido tocar» y el silencio reverencial. En ese entorno, que tenía que ser la antítesis de la taberna, la vista adquiría un papel central. A diferencia de los gabinetes de curiosidades renacentistas, donde la conversación sobre los especímenes definía un espacio pensado para el examen de la colección por parte de la élite que tenía acceso a ellos, los museos burgueses de ciencia, concebidos como espacios de instrucción para el pueblo, se esforzaban por «hablar a los ojos». La propia disposición de los especímenes era ahora la que tenía que hacer legible, a simple vista, el orden de la naturaleza y el lugar que el visitante ocupaba en él. En muchos museos de historia natural de la segunda mitad del siglo XIX, por ejemplo, los visitantes reseguían literalmente los pasos de la evolución, mientras se desplegaba ante sus ojos, sala tras sala, una narrativa lineal y ascendente que culminaba en el «Hombre blanco varón», con la que se justificaba implícita y científicamente la dominación colonial y patriarcal sobre otras «razas» y el otro sexo, considerados inferiores.

Si admitimos, con Bennett, que la corporalidad de la visita es políticamente significativa, ¿qué implica el paso de los museos de ciencia decimonónicos, con sus vitrinas ordenadas y su «prohibido tocar», a los centros de ciencia contemporáneos, en los que se nos exhorta a descubrir por nosotros mismos los grandes principios científicos a través del juego táctil y la diversión?

Los museos interactivos: «Prohibido no tocar»

El relato habitual sobre el nacimiento de los centros de ciencia interactivos responde a esa pregunta en términos de democratización y de empoderamiento de los visitantes. Se invoca el mito fundacional del Exploratorium de San Francisco, creado en 1969 y considerado muchas veces el pionero de una nueva aproximación participativa y táctil [*véase* «Museos de



¿ES NEUTRAL LA INVITACIÓN A PULSAR UN BOTÓN? Más allá de la retórica de la democratización de la ciencia, la historia nos revela otros factores, como intereses comerciales y políticos, que favorecieron el nacimiento de los museos interactivos y su posterior proliferación.

ciencia, hoy», por Ernesto Páramo, *en este mismo número*]. En el Exploratorium, ubicado en un gran hangar sin compartimentar, no había rutas prediseñadas que marcasen los trayectos de los visitantes, que eran libres de interactuar con los objetos y dispositivos exhibidos, así como con los guías del museo, que eran jóvenes estudiantes imbuidos de la atmósfera *hippie* californiana de los años sesenta. Un espacio que daba la oportunidad a los visitantes de descubrir por ellos mismos los grandes principios de la física solo podía resultar en un acercamiento democrático de la ciencia a la ciudadanía.

Sin embargo, ese relato es altamente cuestionable. Para empezar, si ubicamos el Exploratorium en su particular contexto histórico de Guerra Fría, en el que la posibilidad de un holocausto nuclear era ampliamente temida y las bombas de napalm arrasaban Vietnam, nos lo pensaremos dos veces antes de afirmar que el estilo más bien aséptico del Exploratorium sea la mejor manera de avanzar hacia un empoderamiento democrático. Basta con echar un vistazo superficial a la biografía de su impulsor, Frank Oppenheimer, para que afloren de inmediato los vínculos entre ciencia y sociedad: el hecho de que un físico represaliado por el macartismo por ser comunista, cuyo hermano fue una de las principales mentes científicas detrás del desarrollo de la mortífera bomba atómica, presente la ciencia como algo esencialmente lúdico y ajeno a la sociedad tiene causas y consecuencias políticas.

Por otra parte, historiadores como Roland Marchand, Karen Rader o Victoria Cain han documentado exhaustivamente cómo la adopción masiva de la participación lúdica y el contacto táctil con los objetos exhibidos se remonta por lo menos al período de entreguerras.

La Gran Depresión también dejó sentir sus efectos en el estilo expositivo de los museos de ciencia en los Estados Unidos. Ante un clima social que señalaba a la automatización y las empresas que la fomentaban como culpables del desempleo que desgarró la vida de millones de estadounidenses, grandes corporaciones tecnocientíficas como DuPont, Westinghouse o ATT reaccionaron adoptando una agresiva campaña de relaciones públicas. A través de un estilo expositivo al que hoy llamaríamos interactivo, estas empresas usaron las grandes exposiciones universales de Chicago (1934) y Nueva York (1939), así como los entonces recién creados museos de ciencia e industria en esas dos ciudades, para presentar sus laboratorios industriales como garantes de la creación de empleo y del progreso en mayúsculas.

El ejército de psicólogos, diseñadores y publicistas que fue reclutado para la ocasión llegó a la conclusión de que la mejor fórmula para atraer la atención de los visitantes era poner en movimiento los objetos exhibidos, y de que el modo más eficaz de crear empatía y receptividad en el público era implicarle en el espectáculo a través de su participación. Los dispositivos accionables mediante botones fueron masivamente adoptados porque respondían a la perfección a esta doble demanda. Así pues, la centralidad del gesto de pulsar un botón en los museos de ciencia estadounidenses no tiene raíces en ninguna apuesta por democratizar la experiencia de la visita, sino en la adopción de la lógica publicitaria como paradigma pedagógico y en el interés político de las grandes corporaciones por difundir su particular visión sobre la ciencia, la tecnología y las relaciones sociales.

Parafraseando al historiador de la tecnología Melvin Kranzberg, podríamos decir que pulsar un botón no es ni bueno ni malo, ni tampoco es neutral. Como nos enseñan los antropólogos, en cada gesto, en cada objeto, por más banal que parezca, podemos leer las cambiantes relaciones de poder que se dan en el seno de las colectividades humanas. Sin duda, las investigaciones futuras arrojarán más luz a la historia de la interactividad en los museos de ciencia, pero los primeros estudios ya ofrecen algunas pistas para reflexionar de forma crítica sobre la reciente proliferación de centros de ciencia interactivos, así como para cuestionar la inocencia de pulsar un botón.

—Jaume Sastre Juan
Centro Interuniversitario de Historia de las Ciencias y de la Tecnología
Universidad de Lisboa

PARA SABER MÁS

Creating the corporate soul: The rise of public relations and corporate imagery in American big business. Roland Marchand. University of California Press, Oakland, 1998.

Pasts beyond memory: Evolution, museums, colonialism. Tony Bennett. Routledge, Londres, 2004.

Un laboratori de divulgació tecnològica: El New York Museum of Science and Industry i la política de la museïtzació de la tecnologia als Estats Units (1912-1951). Jaume Sastre Juan. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona, 2013.

Life on display: Revolutionizing U.S. museums of science and natural history in the Twentieth Century. Karen Rader y Victoria Cain. The University of Chicago Press, Chicago, 2014.

EXOPLANETAS

CARMENES, el detector de exotierras

El primer espectrógrafo de alta resolución diseñado en exclusiva para descubrir planetas habitables similares a la Tierra ya ha comenzado a tomar datos desde el Observatorio de Calar Alto

JOSÉ A. CABALLERO

Yo nací en 1977, el año del lanzamiento de las sondas *Voyager* y del estreno de *La guerra de las galaxias*. Con cuatro años me llevaron al cine a ver la película y, al salir, ya tenía claro lo que quería ser de mayor: descubridor de planetas. Casi cuatro décadas después y prácticamente al mismo tiempo, se estrenaba *El despertar de la Fuerza* y finalizaba la fase de pruebas de CARMENES, un proyecto que en los próximos años buscará planetas parecidos a la Tierra desde el Observatorio de Calar Alto, en Almería. Tras siete años desde su concepción, cinco de diseño y recaudación de fondos y tan solo dos de construcción, el instrumento CARMENES vio su primera luz en noviembre de 2015. Dos meses después, en enero de este año, comenzaba a hacer el trabajo para el que fue diseñado.

Instalado en el telescopio de 3,5 metros del Centro Astronómico Hispano-Alemán de Calar Alto, CARMENES ha sido diseñado y construido por un consorcio de diez instituciones de investigación, cinco en Alemania y cinco en España, más el propio observatorio. El nombre del instrumento responde a un acrónimo en inglés que lo dice casi todo: *Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and visible Échelle spectrographs*, que podría traducirse como «Búsqueda de alta resolución en Calar Alto de enanas de tipo M con exotierras mediante espectrógrafos *échelle* en el visible y el infrarrojo cercano».

Durante 600 noches entre enero de 2016 y diciembre de 2018, CARMENES estará estudiando unas 300 estrellas de tipo M (menores y más frías que el Sol) con el objetivo de detectar planetas similares a la Tierra en su zona habitable, es decir, donde la temperatura permitiría la existencia de agua líquida sobre la superficie de un planeta. Se trata de un proyecto único en el mundo que, con suerte, multiplicará el número de planetas conocidos en torno a las estrellas más abundantes del universo.

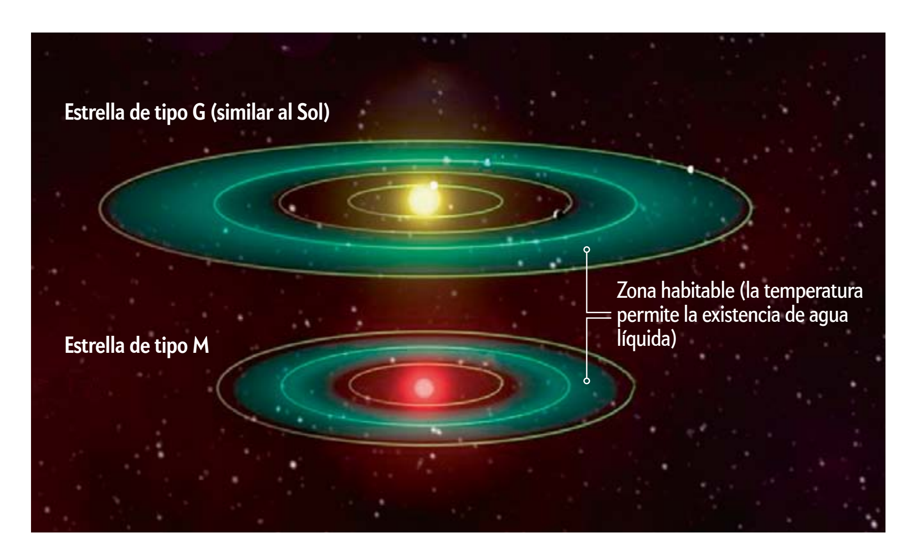
Exotierras cálidas en estrellas frías

Hasta 1995, la existencia de planetas alrededor de otras estrellas era un asunto casi exclusivo de la ciencia ficción. Todo cambió en otoño de aquel año, cuando un equipo de la Universidad de Ginebra anunció el descubrimiento de 51 Pegasi b, el primer exoplaneta descubierto en torno a una estrella de la secuencia principal, y un grupo del Instituto de Astrofísica de Canarias halló Teide 1, la primera enana marrón, el puente entre las estrellas y los planetas. En ambos casos, sin embargo, se trataba de astros gigantescos en comparación con la Tierra: la masa de 51 Pegasi b es del mismo orden que la de Júpiter, mientras que la de Teide 1 es unas 50 veces mayor que la del gigante gaseoso.

En los años posteriores, mientras hacía mi tesis doctoral con el equipo de las enanas marrones, el grupo suizo siguió descubriendo más exoplanetas con el instrumento HARPS, un espectrógrafo de alta resolución instalado en el telescopio MPG/ESO de 2,2 metros del Observatorio de La Silla, en Chile. Durante más de una década, HARPS fue el referente mundial en el descubrimiento de exoplanetas. En 2009, el relevo lo tomó la misión espacial Kepler, de la NASA.

A la vuelta de mi primera experiencia posdoctoral en el extranjero, Rafael Rebolo, mi exsupervisor de tesis y actual director del Instituto de Astrofísica de Canarias, me preguntó por mi objetivo fundamental en ciencia. «Descubrir el primer planeta como la Tierra en una zona habitable», contesté. Pero ¿cómo lograrlo, si ni HARPS ni Kepler lo habían conseguido? La respuesta: observando estrellas de tipo M con un espectrógrafo infrarrojo.

CARMENES es, hoy por hoy, un instrumento excepcional en el mundo: se trata del único espectrógrafo doble, ultraestable y de alta resolución que, en una sola exposición, cubre desde la región visible del espectro hasta el infrarrojo. Para hacernos una idea, HARPS y su clon en la isla de La Palma, HARPS-N, cubren desde los 0,38 hasta los 0,69 micrómetros. CARMENES, sin embargo, abarca desde los 0,52 hasta los 1,71 micrómetros (el espectro visible comprende desde los 0,4 hasta los 0,8 micrómetros, aproximadamente). Es en este micrómetro extra donde las



NASA

EL PROYECTO CARMENES buscará planetas habitables similares a la Tierra en torno a estrellas enanas de tipo M. Para ello empleará el «método del vaivén», consistente en medir las ligeras sacudidas que la gravedad de un planeta cercano provoca sobre su estrella anfitriona. Dicho efecto es mayor cuanto más próximo se halla el planeta al astro. Las enanas de tipo M (*abajo*) son más pequeñas y frías que las estrellas similares al Sol (de tipo G, *arriba*), por lo que su zona de habitabilidad (*verde*) se encuentra más cerca. Esa circunstancia facilita en gran medida la detección de posibles planetas en su zona habitable.



TELESCOPIO ZEISS de 3,5 metros del Observatorio de Calar Alto, en Almería, donde se encuentra instalado el instrumento CARMENES.

CENTRO ASTRONÓMICO HISPANO-ALEMÁN DE CALAR ALTO

estrellas de tipo M, las más frías y abundantes del universo y del vecindario solar, emiten su máximo de radiación. Así pues, aunque HARPS resulta óptimo para descubrir supertierras o minineptunos (planetas unas diez veces más masivos que el nuestro) alrededor de estrellas de tipo G, similares a nuestro Sol, es prácticamente ciego a las estrellas de tipo M.

Tanto CARMENES como HARPS emplean el efecto Doppler para medir el ligero bamboleo que sufre una estrella debido a la influencia gravitatoria que ejercen sobre ella los planetas que giran a su alrededor. Cuanto menor es la masa de la estrella y más cerca se encuentra un planeta, más fácil resulta detectar dicho bamboleo. Las estrellas enanas de tipo M presentan masas entre dos y diez veces menores que la del Sol; además, son considerablemente más frías, por lo que su zona habitable se halla más próxima al astro. Como consecuencia, con CARMENES resulta factible detectar exotierras habitables a su alrededor.

Innovaciones técnicas

Como mencionábamos al principio, CARMENES opera en el telescopio de 3,5 metros de Calar Alto. El instrumento consta de varias partes. En el foco Cassegrain del telescopio hay un dispositivo, denominado «frontal», que contiene el sistema de adquisición de guiado (para mantener la estrella en el campo de visión) y la alimentación de las fibras ópticas que llevan la luz estelar a una estancia situada varios metros más abajo. Dicha sala, llamada *coudé*, alberga las unidades de calibración, el sistema de control térmico, la electrónica y los ordenadores, así como dos tanques de vacío de 3 metros de largo y 1,5 metros de diámetro, en cuyo interior se hallan todos los componentes optomecánicos de los espectrógrafos visible e infrarrojo: espejos, cámaras, redes de dispersión, detectores, etcétera.

La novedad de CARMENES, que al mismo tiempo es también fuente de complejidad, radica en que aquel micrómetro extra nos obliga a utilizar un detector especial y muy caro, y a enfriar todo el canal infrarrojo a menos de 130 grados Celsius bajo cero. El desafío no se encuentra en la baja temperatura, sino en mantenerla estable con una precisión de pocas milésimas de grado en todo el material de alta tecnología situado en el interior del tanque de vacío, con un peso total de más de una tonelada.

En la actualidad existen otros proyectos de búsqueda de planetas en torno a estrellas de tipo M, como el Descubridor de Planetas en la Zona Habitable (HPF) estadounidense, el Instrumento Doppler Infrarrojo (IRD) japonés, o el Espectropolarímetro Infrarrojo (SPIRou) francocanadiense. Aunque todos ellos están desarrollando sus propios espectrógrafos infrarrojos de alta resolución, les quedan meses o incluso años para entrar en funcionamiento. Además, aunque se instalen en telescopios mayores y con sistemas de calibración de longitud de onda más complejos (HPF e IRD) o lleguen hasta las 2,2 micras y puedan medir la polarización de la luz estelar (SPIRou), CARMENES seguirá siendo el único con dos canales, uno visible y otro infrarrojo.

Hoy por hoy se conocen 30 estrellas enanas de tipo M próximas al sistema solar cuyos planetas han sido estudiados con espectroscopía Doppler. Nuestras previsiones más pesimistas arrojan que CARMENES descubrirá otros 30 planetas más; las más optimistas, hasta 130 mundos, lo que quintuplicaría el número de planetas ya conocidos en torno a las estrellas más abundantes del universo. Algunos de ellos tendrán la masa y el tamaño de la Tierra, y unos pocos estarán a la distancia justa de su estrella anfitriona para permitir la existencia de agua líquida sobre su superficie, por lo que cabe esperar que sean habitables.

Hasta el estreno de *El despertar de la Fuerza*, la tecnología para descubrir otras tierras no existía; hoy es una realidad gracias a CARMENES. De cara al futuro, este instrumento servirá además como prototipo para la instrumentación del Telescopio Europeo Extremadamente Grande (E-ELT), un ambicioso proyecto paneuropeo para construir el mayor telescopio del mundo, con un espejo de 39 metros de diámetro y con el que podremos descubrir planetas como Tatooine, Alderaan, Yavin IV, Hoth, Dagobah, Bespin...

—José A. Caballero
Observatorio de Königstuhl (LSW)
Centro de Astronomía
de la Universidad de Heidelberg
Director adjunto del proyecto
CARMENES

PARA SABER MÁS

Manufacturing, assembly, integration and verification of CARMENES and Preparation of its input catalogue. A. Quirrenbach et al. en *Proceedings of the 18th Cambridge workshop on cool stars, stellar systems, and the sun*, junio de 2014.

CARMENES instrument overview. A. Quirrenbach et al. en *SPIE Conference Series, vol. 9147: Ground-based and airborne instrumentation for astronomy V*, julio de 2014.

Página web del proyecto CARMENES: **carmenes.caha.es**

EN NUESTRO ARCHIVO

Exoplanetas habitables. Dimitar D. Sasselov y Diana Valencia en *IyC*, octubre de 2010.

Más acogedores que la Tierra. René Heller en *IyC*, marzo de 2015.

Exoplanetas: los próximos 20 años. Alexandra Witze en *IyC*, febrero de 2016.



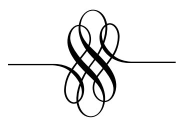
NUEVA ESPECIE HUMANA: *Homo naledi* plantea preguntas sobre el origen y la evolución de nuestro género. En esta réplica del cráneo, las zonas blancas indican las partes de hueso que faltan.

EVOLUCIÓN HUMANA

EL MISTERIOSO HOMO NALEDI

Una sorprendente colección de fósiles ha reavivado el debate sobre los orígenes de nuestra especie

Kate Wong



ISTOCKPHOTO (*chinchetas*); CORTESÍA DE JOHN HAWKS, UNIVERSIDAD DE WISCONSIN-MADISON Y UNIVERSIDAD DEL WITWATERSRAND (*todas las fotografías*)

EN SÍNTESIS

En 2013, una colección de enigmáticos fósiles apareció en Rising Star, un sistema de cuevas cercano a Johannesburgo. Por el momento se han extraído más de 1550 huesos y fragmentos pertenecientes a al menos 15 individuos.

El descubrimiento se anunció a bombo y platillo el pasado septiembre. Los autores sostienen que los fósiles pertenecen a una nueva especie, *Homo naledi*, que pone en entredicho varias ideas muy arraigadas sobre los orígenes de *Homo*.

H. naledi presenta una insólita mezcla de características, y algunos indicios sugieren que incluso habría gozado de pensamiento simbólico. Sin embargo, se han formulado críticas sobre los métodos de extracción y análisis de los fósiles.

Kate Wong es redactora de *Scientific American*.

EL FLAMANTE GABINETE DE FÓSILES de la Universidad del Witwatersrand, en Johannesburgo, se queda pequeño. Sus vitrinas están repletas de huesos de nuestros parientes humanos más antiguos, descubiertos durante los últimos 92 años en las numerosas cuevas de la Cuna de la Humanidad, famosa región a tan solo 40 kilómetros al noroeste de donde nos encontramos. Esta colección de fósiles de humanos extintos está considerada desde hace tiempo una de las más completas del mundo. Aun así, en fecha reciente sus posesiones se han duplicado debido al hallazgo de cientos de huesos y fragmentos en Rising Star, un sistema de cuevas de la zona. En opinión del paleoantropólogo Lee Berger y sus colaboradores, quienes desenterraron y analizaron los restos, corresponden a una nueva especie humana, *Homo naledi* —así llamada por la palabra *estrella* en la lengua sesotho—, que podría invalidar ideas muy arraigadas sobre el origen y la evolución de nuestro género, *Homo*.



ENTRADA AL PASADO: Los fósiles de *Homo naledi* se descubrieron en una cueva de la Cuna de la Humanidad, en Sudáfrica.

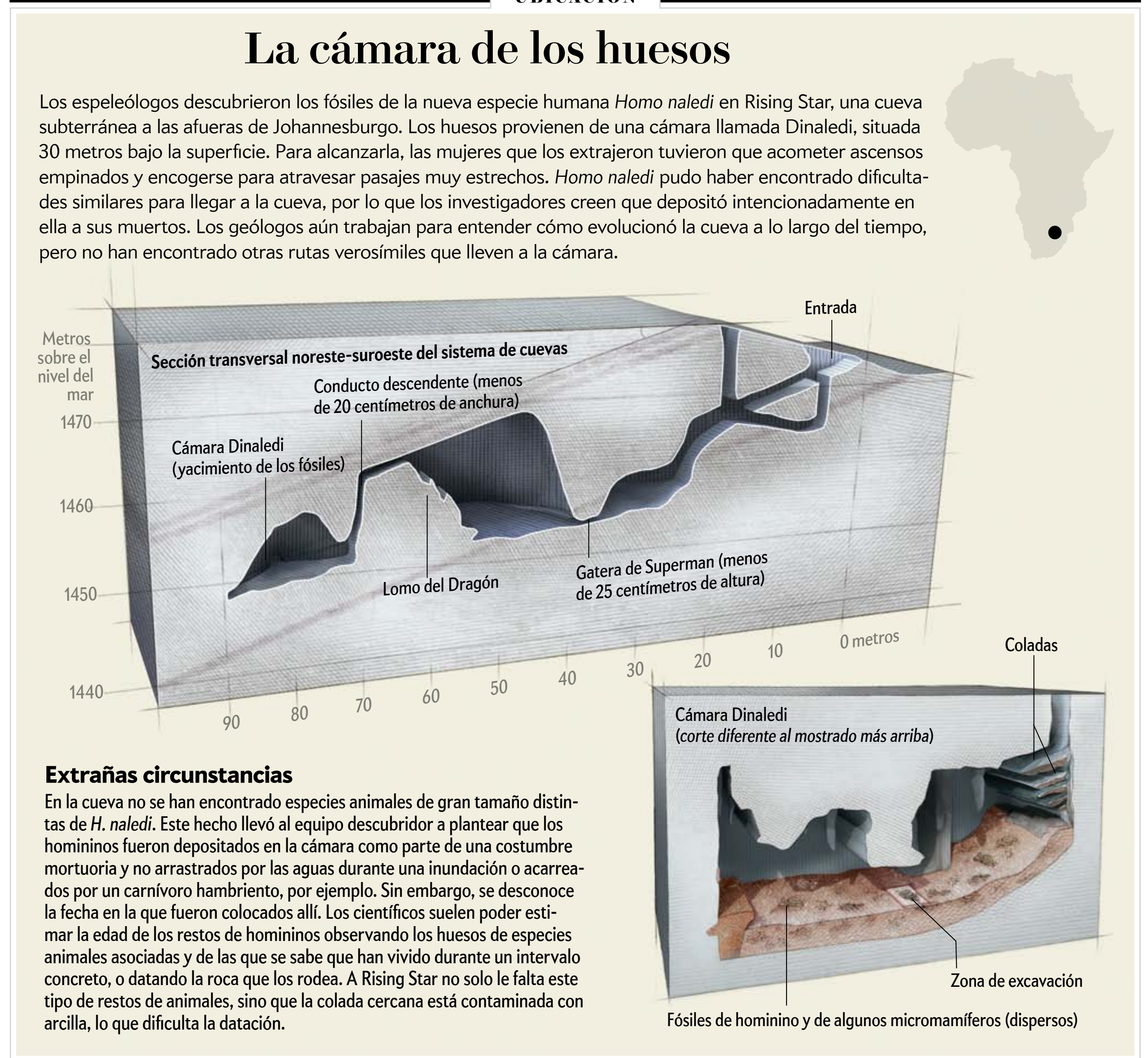
A finales de 2015, Berger, con una chaqueta de cuero marrón y listo para la cámara, está a punto de empezar a perorar ante una docena de periodistas que nos congregamos a su alrededor en el gabinete de fósiles. Dirige la atención de los visitantes hacia seis estuches —en un principio para fusiles de asalto— desplegados sobre mesas por toda la habitación. Cada uno contiene en sus compartimentos de gomaespuma un impresionante surtido de fósiles. En las vitrinas de la pared del fondo se observan docenas de recipientes de plástico transparente con huesos de *H. naledi* etiquetados como «fragmentos de cráneo», «pelvis» o «radio». Berger toma el estuche número dos, el que contiene las joyas de la corona de la asociación de fósiles de Rising Star —los huesos que caracterizan la especie— y extrae un maxilar superior y otro inferior. Los coloca cuidadosamente uno sobre el otro y muestra cómo encajan, con un ademán ensayado para que todos puedan observarlo bien. El grupo profiere un murmullo de aprobación y enseguida los bolígrafos empiezan a garabatear, las cámaras a disparar, y los *flashes* a brillar. A continuación se dirige hacia el siguiente espécimen y va respondiendo preguntas, posando para las fotos y animando a los visitantes a sacarse *selfies* con las celebridades del gabinete.

Hace tan solo unas décadas, el total de los fósiles pertenecientes a nuestros parientes humanos extintos, también denominados homininos, cabía en el cajón de un escritorio. Esos días de penuria quedaron atrás. Desde entonces se han recopilado más indicios de la historia evolutiva de la familia humana que de muchos otros grupos de animales, incluidos nuestros parientes vivos más cercanos, los grandes simios. Gracias a ello sabemos ahora que, por ejemplo, las raíces de la humanidad se remontan hasta hace al menos siete millones de años, y que durante gran parte de ese tiempo nuestros antepasados compartieron el planeta con otros homininos.

Con todo, a los científicos todavía les queda mucho que aprender. Algunos capítulos de la historia humana son completamente desconocidos en el registro fósil; otros están fundamentados en pruebas tan exiguas que constituyen poco más que especulaciones. Por tanto, aunque el registro fósil humano es hoy mucho más abundante de lo que fue, todavía resulta tan imperfecto que los hallazgos novedosos siguen trastornando las ideas que los científicos tienen del pasado de la humanidad; a veces, de manera considerable.

Los fósiles de Rising Star son los últimos que han sacudido a la comunidad paleoantropológica. Berger y su equipo sostienen que *H. naledi* podría arrojar una muy anhelada luz sobre los orígenes de *Homo* y remozar el árbol genealógico humano. Más aún, los investigadores proponen que esta criatura, con un cerebro del tamaño de una naranja, celebraba rituales, un comportamiento hasta ahora atribuido exclusivamente a homininos

UBICACIÓN



La cámara de los huesos

Los espeleólogos descubrieron los fósiles de la nueva especie humana *Homo naledi* en Rising Star, una cueva subterránea a las afueras de Johannesburgo. Los huesos provienen de una cámara llamada Dinaledi, situada 30 metros bajo la superficie. Para alcanzarla, las mujeres que los extrajeron tuvieron que acometer ascensos empinados y encogerse para atravesar pasajes muy estrechos. *Homo naledi* pudo haber encontrado dificultades similares para llegar a la cueva, por lo que los investigadores creen que depositó intencionadamente en ella a sus muertos. Los geólogos aún trabajan para entender cómo evolucionó la cueva a lo largo del tiempo, pero no han encontrado otras rutas verosímiles que lleven a la cámara.

Extrañas circunstancias

En la cueva no se han encontrado especies animales de gran tamaño distintas de *H. naledi*. Este hecho llevó al equipo descubridor a plantear que los homininos fueron depositados en la cámara como parte de una costumbre mortuoria y no arrastrados por las aguas durante una inundación o acarreados por un carnívoro hambriento, por ejemplo. Sin embargo, se desconoce la fecha en la que fueron colocados allí. Los científicos suelen poder estimar la edad de los restos de homininos observando los huesos de especies animales asociadas y de las que se sabe que han vivido durante un intervalo concreto, o datando la roca que los rodea. A Rising Star no solo le falta este tipo de restos de animales, sino que la colada cercana está contaminada con arcilla, lo que dificulta la datación.

FUENTE: «GEOLOGICAL AND TAPHONOMIC CONTEXT FOR THE NEW HOMININ SPECIES *HOMO NALEDI* FROM THE DINALEDI CHAMBER, SOUTH AFRICA», PAUL H. G. M. DIRKS ET AL., EN *ELIFE*, ART. N.º 09561; PUBLICADO EN LÍNEA EL 10 DE SEPTIEMBRE DE 2015; JOSÉ MIGUEL MAYO (*ilustración*)

de cerebro mucho mayor. Este hallazgo podría echar por tierra la idea prevaleciente que asocia la complejidad cognitiva a un cerebro voluminoso.

Algunos han rechazado de plano estas aseveraciones; otros las han recibido con una reticencia inusual. Para muchos, que se desconozca la edad de los huesos supone un obstáculo importante. Podrían tener más de 4 millones de años o menos de 100.000. Sin embargo, la falta de datación no es lo único que preocupa a los ajenos al hallazgo. El modo en que se desenterraron y analizaron los fósiles y se dieron a conocer al resto del mundo ha incomodado a los grandes especialistas en la materia, que acusan a Berger y sus colaboradores de precipitar los trabajos y de anteponer la publicidad a la ciencia. En una disciplina conocida por sus fuertes rivalidades, los debates acalorados sobre nuevos descubrimientos constituyen la norma. Pero en la disputa sobre los restos de Rising Star no solo están en entredicho algunos egos. La manera en que los científicos reaccionen a largo plazo a este descubrimiento podría dar un nuevo rumbo a la búsqueda de los orígenes humanos, lo que cambiaría no solo las cuestiones que se formulan, sino también el modo de responderlas.

LA CÁMARA DE LOS SECRETOS

El desencadenante de todo el espectáculo fueron unas fotografías borrosas que le mostraron a Berger el 1 de octubre de 2013. El investigador había contratado al geólogo Pedro Boshoff para que buscara nuevos yacimientos de homininos en la Cuna de la Humanidad. A lo largo de los años, mineros y cazadores de fósiles han peinado la región una y otra vez, pero Berger tenía buenas razones para pensar que quedaba mucho por descubrir. Cinco años antes, su hijo de nueve años se había topado con huesos de un miembro de la familia humana hasta entonces desconocido, *Australopithecus sediba*, justo en medio de la Cuna.

Boshoff y los espeleólogos locales Rick Hunter y Steven Tucker habían encontrado unos huesos de apariencia humana esparcidos por el suelo de una cámara de muy difícil acceso, a 30 metros de profundidad. Esta se encontraba en el sistema de





cuevas Rising Star, a pocos kilómetros de donde Berger y su hijo habían descubierto *A. sediba*. Los exploradores no se llevaron nada, pero tomaron fotografías. En el momento en que Berger las vio comprendió la importancia de los huesos. Mostraban características que diferían claramente de las del ser humano anatómicamente moderno, *Homo sapiens*. Y había muchos, los suficientes para reconstruir un esqueleto.

Berger empezó enseguida a concebir planes para extraer los restos. Pero se encontró con un problema: no podía encargarse de ello él mismo. La ruta desde la entrada de la cueva hasta la cámara que guardaba los huesos contenía pasadizos demasiado estrechos para la ancha complexión física de Berger y para la de la mayoría de sus colaboradores científicos. Ampliar los pasadizos comprometería la integridad de la caverna y quizá dañaría los huesos, por lo que no cabía ni pensar en ello. Así que, a través de su página de Facebook, buscó científicos de cuerpo menudo, que tuviesen experiencia en espeleología y excavación de restos y que pudiesen desplazarse a Johannesburgo con poca antelación. A cambio, les ofrecía poco más que un billete de avión y la promesa de aventuras.

Cinco semanas después de que Boshoff le enseñara las prometedoras fotografías, Berger ya había seleccionado a su equipo de excavadoras —casualmente, todas mujeres— para llevar a cabo la difícil y peligrosa tarea de extraer los huesos de la cámara, así como a un equipo de apoyo. Estableció un protocolo para recoger el material y documentar con exactitud de dónde provenía cada hueso. Asimismo, eligió a un grupo de científicos experimentados para que supervisaran la excavación con un circuito cerrado de televisión e identificaran, registraran y almacenaran los especímenes según se iban extrayendo. También planeó cómo se publicitaría la tarea: con una campaña mediática completa en colaboración con *National Geographic* y NOVA, la cual incluiría tuits en directo, blogs diarios, entrevistas de radio y videoclips publicados desde el yacimiento, así como un documental de televisión que se emitiría más tarde, una vez los restos óseos se hubiesen hecho públicos. El 10 de noviembre, con las cámaras grabando, las espeleólogas reptaron, treparon y gatearon para llegar hasta la cámara, completamente a oscuras, y empezó la recolección.

Marina Elliot fue la primera científica en acceder a la cámara. «No sabía qué esperar, pero estaba emocionada», recuerda mientras la acompaño al yacimiento de Rising Star. Es el mediodía de una cálida jornada del verano austral. Fuera de la cueva, el viento transporta el sonido de los coches de la autopista cercana. Dentro, sin embargo, la caverna está sombría, fresca y silenciosa: una quietud de milenios. Un rayo de luz proveniente de una abertura natural que hay sobre nosotros ilumina el escarpado interior y le da un aire de lugar de culto.

La serenidad de esta parte de la cueva no presagia los peligros que oculta su interior. Elliot apunta la linterna hacia uno de los corredores e ilumina una pared de caliza perforada. Tras ella, me explica, se encuentra el primero de los estrechamientos del camino que lleva a la cámara de los fósiles: la gatera de Superman, una angostura que las mujeres tuvieron que franquear tumbadas sobre el vientre y con un brazo estirado. El trayecto no mejora a partir de ahí. Más adelante se cierne el dentado Lomo del Dragón, seguido de un conducto descendente vertical de 12 metros de longitud y menos de 20 centímetros de anchura que lleva a la cámara de los huesos.

Pero sus esfuerzos fueron recompensados con creces. Hallaron restos óseos por todas partes, muchos más que el único esqueleto que Berger esperaba rescatar. En los 21 días siguientes, Elliot y sus colaboradores sacaron 1200 especímenes. En marzo de 2014, una segunda expedición, más corta, cosechó varios centenares más. En total, el equipo obtuvo más de 1550 huesos y fragmentos de al menos 15 individuos —entre ellos niños, adolescentes y adultos jóvenes y mayores— en un área del tamaño de una mesa de jugar a las cartas. Cabe destacar que se trata de una de las mayores asociaciones de fósiles de hominino jamás descubiertas, y eso que los investigadores solo han escarbado la superficie. En la cámara quedan todavía muchos más huesos, posiblemente millares.

NACE UNA ESTRELLA

Con una caja tras otra llena de fósiles de hominino, Berger y sus colegas se enfrentaban ahora a la ingente tarea de analizarlos. Rodeaba al hallazgo un aura de misterio incluso antes de que los investigadores empezaran su evaluación formal, cuando todavía los huesos estaban saliendo de la tierra. Por un lado, los huesos parecían poseer una extraña combinación de rasgos primitivos y modernos. Por otro, ningún resto de animal había aparecido en la cámara junto a los huesos de los homininos, con excepción de los de unos pocos pájaros y roedores pequeños. En general, a los fósiles de hominino, y en particular a los descubiertos





DE LA CABEZA A LOS PIES: La gran colección de fósiles de Rising Star incluye huesos del pie (*primera a la izquierda*), lo que no es frecuente, y múltiples huesos de la pierna (*segunda a la izquierda*). Aunque fragmentarios, los fósiles están perfectamente preservados y algunos pueden atribuirse al mismo individuo, como es el caso de varios fragmentos de mandíbula y cráneo (*arriba*).

en cuevas subterráneas, los acompañan casi siempre restos de animales mayores: monos, antílopes, hienas. Su ausencia en Rising Star exigía una explicación.

Berger reclutó un ejército de 35 investigadores principiantes para que le ayudaran a describir las piezas durante un seminario de un mes de duración celebrado en mayo de 2014 en Johannesburgo. Para la mayoría —muchos estaban redactando su tesis doctoral—, aquello suponía una oportunidad excepcional de analizar fósiles nuevos en vez de material ya descrito por científicos más experimentados. Organizaron grupos de trabajo para las diferentes partes del cuerpo: cráneo, mano, dientes, espina dorsal, cadera, pierna, pie, etcétera.

Cuando pusieron en común sus resultados, afloró la sorprendente imagen de un hominino esbelto, con extremidades superiores construidas para trepar y usar herramientas, extremidades inferiores aptas para dar zancadas en posición vertical, y dotado de un cerebro poco voluminoso. Una criatura «muy, muy extraña», en palabras de Berger.

Un viernes por la tarde del mes de diciembre, John Hawks, de la Universidad Wisconsin-Madison y miembro del equipo —uno de los científicos principales—, me conduce al gabinete para señalarme algunos de los aspectos más representativos de los restos de Rising Star. Sus colaboradores están fuera, celebrando con una barbacoa y unas cervezas la fiesta del departamento por las vacaciones. Pero aquí, rodeado de huesos, Hawks se encuentra en su elemento. Se mueve de un lado a otro de la habitación colocando los estuches de los fósiles en las mesas y seleccionando, de entre la gran colección del gabinete, réplicas de otros especímenes de homininos para que sirvan de comparación.

Ya el cráneo presenta una mezcolanza de rasgos asociados a diferentes especies de homininos. Debía de albergar un cerebro reducido, de entre 450 y 550 centímetros cúbicos, un tamaño parecido al del cerebro del primitivo *Australopithecus afarensis*, más conocido como Lucy, un esqueleto de 3,2 millones de años descubierto en Etiopía en 1974. Sin embargo, la morfología del cráneo recuerda a la de *Homo erectus*, más parecida a la humana. Los dientes se asemejan a los de *Homo habilis*, uno de los miembros más primitivos de nuestro género, por la manera en que van aumentando de tamaño desde la parte delantera a la posterior. Pero, en general, los dientes son pequeños y los molares tienen coronas sencillas, con menos cúspides y más bajas, rasgos asociados a miembros posteriores de *Homo*.

El resto de la osamenta repite la mezcolanza. La extremidad superior combina un hombro y unos dedos adaptados para trepar con una muñeca y una palma hechas para manipular herramientas líticas: una actividad que no se consideraba importante en aquellos homininos que aún no habían abandonado la vida en los árboles y desarrollado cerebros voluminosos y creativos. Por su parte, las extremidades inferiores incluyen una articulación de la cadera parecida a la de Lucy y un pie casi idéntico al nuestro. Hasta ahora, los expertos habían supuesto que las características distintivas de *Homo*, como una mano apta para la fabricación de herramientas, un cerebro grande y dientes pequeños, evolucionaron en sintonía. «*Sediba* y *naledi* muestran que varias partes que pensábamos que habían evolucionado a la vez no lo hicieron así», asegura Hawks.

Esta combinación sin precedentes de características antiguas y modernas no es lo único que distingue a *H. naledi*. El fósil también tiene rasgos jamás vistos en un miembro de la familia humana. Hawks extrae uno de los huesos de dedo de su compartimento de gomaespuma. Es el primer metacarpo, el hueso de la palma que está a continuación del pulgar. Cuando lo coloca al lado del primer metacarpo de un ejemplar de *H. sapiens*, la diferencia es notable. Mientras que el cuerpo del hueso de *H. sapiens* es liso, grueso y ancho en toda su extensión, el metacarpo de *H. naledi* es de base estrecha y cabeza ancha, y tiene una cresta afilada que recorre toda su longitud y delgados rebordes a los lados. El fémur también presenta características únicas, igual que otros elementos.

Para Berger y sus colaboradores, esa novedosa combinación de características de australopitecino y *Homo*, junto con la presencia de rasgos únicos, justificaba perfectamente atribuir los fósiles de Rising Star a una nueva especie de hominino. Aunque los investigadores todavía han de establecer la edad de los huesos, en el artículo donde anunciaron su descubrimiento —publicado el pasado mes de septiembre en la revista en línea de acceso

Una mezcla intrigante

Las excavaciones en Rising Star han aportado más de 1550 especímenes de fósiles de *Homo naledi* pertenecientes a un mínimo de quince individuos de todas las edades, de bebés a viejos. En la colección están representados casi todos los huesos del cuerpo, muchos de ellos más de una vez. A partir de estos restos se ha reconstruido una criatura con una sorprendente combinación de rasgos, unos asociados a los primitivos australopitecinos, otros observados en varias especies de nuestro género, *Homo*, así como algunas características no conocidas en ninguna otra especie de homínino. Este diagrama resalta algunos ejemplos de esas características.

H. naledi *H. sapiens* *Australopithecus*

El cráneo de *H. naledi* alojaba un cerebro pequeño, de 450 centímetros cúbicos, un tamaño típico de los australopitecinos pero bastante menor que el del cerebro de *Homo sapiens* o el de la mayoría de los miembros de *Homo*.

Los dientes son primitivos en el modo en que aumentan de tamaño desde delante hacia atrás. En general son pequeños y los molares tienen, comparativamente, cúspides sencillas, características propias de miembros de *Homo* posteriores.

La cavidad del hombro está orientada hacia arriba, como la de un simio o un australopitecino, y no hacia fuera y al lado, como la nuestra. Esta orientación hacia arriba es una adaptación para trepar a los árboles.

Primer metacarpo

H. naledi

H. sapiens

La mano posee dedos muy curvos, lo que sugiere que *H. naledi* trepaba por los árboles. Pero la muñeca y la palma parecen modernas y adaptadas para manipular herramientas. El primer metacarpo de *H. naledi*, el hueso de la palma tras la falange inferior del pulgar, no parece ni de *Homo* ni de *Australopithecus*; es totalmente único.

El fémur tiene una cabeza pequeña y un cuello largo en comparación con la gran cabeza y el reducido cuello del fémur de *Homo sapiens*. Estas características sugieren que la cadera de *H. naledi* funcionaba como la de un australopitecino.

H. naledi *Australopithecus* *H. sapiens*

Una nueva rama en nuestro árbol

El equipo descubridor afirma que la particular mezcla de características de *H. naledi* sugiere que la especie surgió cerca de los orígenes de *Homo*, codiciado lugar en el árbol familiar. Pero *H. naledi* preserva partes de la anatomía que no son conocidas en otras especies tempranas de *Homo*, lo que complica los esfuerzos por saber cómo estos homininos extintos están emparentados entre sí y con nosotros.

El pie se parece muchísimo al nuestro —aparte de los dedos ligeramente curvados y el arco algo más bajo— y, por tanto, está bien adaptado para dar zancadas en posición erguida. Pero la combinación de un pie moderno y una cadera primitiva significa que *H. naledi* caminaba de manera diferente a la nuestra.

H. sapiens

H. naledi

H. naledi

H. sapiens

Australopithecus (naranja)

H. naledi

Homininos más antiguos (*gris*)

Homo (verde)

Paranthropus (azul)

Millones de años atrás: 7 6 5 4 3 2 1 Hoy

PORTIA SLOAN ROLLINGS (*ilustración*), JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

abierto *eLife*— proponían que, dado lo primitivo de sus características en comparación con las de otras especies tempranas de *Homo,* como *H. habilis* y *H. erectus*, *H. naledi* podría tener una antigüedad de más de dos millones de años y provenir de la base del género *Homo*. De ser cierto, se trataría de un hallazgo espectacular, ya que los orígenes de *Homo* constituyen el mayor misterio de la evolución humana. Los fósiles de transición entre los australopitecinos, con sus numerosos rasgos simiescos, y los *Homo* posteriores, con una estructura corporal moderna, son sumamente escasos y, en su mayoría, solo fragmentos. Los expertos están ávidos por dar con nuevos descubrimientos que les permitan esclarecer qué especie del árbol genealógico de los homininos fundó la rama *Homo* y cómo evolucionaron las características corporales del ser humano moderno.

Sin embargo, el equipo de Berger no se limitó a afirmar que el hallazgo podía estar relacionado con los orígenes de *Homo*. También defendió que el inesperado mosaico de rasgos evidente en *H. naledi* enseña que no se pueden usar fragmentos aislados para explicar las relaciones evolutivas de los fósiles humanos, ya que las partes no pueden predecir el todo: palabras polémicas para aquellos investigadores que han interpretado huesos aislados como los indicios más antiguos del linaje de *Homo*.

Pero, aparte de sus ideas acerca de lo que este hallazgo implica para nuestro conocimiento de las relaciones entre homininos, tal vez más provocativa sea la interpretación que el equipo hace del comportamiento de *H. naledi*. En sus intentos por descifrar cómo acabaron aquellos seres en una cámara, sopesaron numerosos mecanismos esgrimidos en el pasado para explicar la acumulación de homininos en otros yacimientos, como que una inundación hubiera arrastrado los huesos hasta el sistema de cuevas, o que grandes carnívoros hubieran trasladado hasta allí los cuerpos para devorarlos. Con todo, los datos disponibles no encajan con ninguna de estas hipótesis. Las aguas de una inundación, por ejemplo, habrían transportado hasta allí también los restos de otros animales, y los carnívoros habrían dejado en los huesos marcas de dientes características. Los investigadores tuvieron en cuenta todas estas posibilidades y, al final, concluyeron que la explicación más probable era que *H. naledi* hubiese depositado deliberadamente los cuerpos en la cámara.

Los homininos habrían tenido que esforzarse mucho para ese traslado. Aunque los geólogos del equipo todavía no saben con exactitud cómo se formó y cambió con el tiempo el sistema de cuevas de Rising Star, tan solo han dado con una entrada a la cámara de los huesos: el estrechamiento que obligó a las exploradoras a encogerse para poder recuperar los fósiles. Si esa era la única entrada, quienquiera que se hubiese deshecho de los muertos habría tenido, como mínimo, que escalar los 20 metros del Lomo del Dragón para alcanzar la apertura del conducto que da acceso a la cámara y, desde allí, bajar reptando por el conducto con los cadáveres o dejar que se deslizaran hasta caer en la cámara. Y si, como creen los investigadores, la ruta hacia ella ha estado siempre absolutamente a oscuras, los homininos habrían necesitado una fuente de luz artificial para encontrar el camino. Ello implicaría que, a pesar de su reducido cerebro, *H. naledi* no solo celebraba rituales funerarios, sino que también dominaba el fuego.

Arrellanado en un sillón de cuero en la zona de estar de su despacho y con una taza de café en mano, Berger se lanza a una discusión sobre lo que significa el hallazgo de Rising Star para la evolución humana. Son las 7:30 de la mañana, pero las persianas están bajadas y las luces son tenues. Entre las alfombras de piel de animal que decoran el suelo y la música jazz proveniente de un tocadiscos *vintage*, la habitación recuerda más al refugio de caza de un aristócrata que a un lugar de trabajo. «No hay edad que [el hallazgo] no perturbe», afirma exultante. Si es antiguo, indicaría que algunos rasgos físicos y conductuales decisivos pudieron haber surgido en los inicios de nuestro género o antes, y no con formas posteriores de *Homo*. Un *H. naledi* muy antiguo podría incluso expulsar a los australopitecinos de la línea que lleva hasta nosotros. Si, por el contrario, los fósiles son jóvenes, habrá que reconsiderar qué especie fue la responsable de los restos culturales que se han hallado en yacimientos arqueológicos clave dispersos por toda África.

Puede que *H. naledi* se originara hace millones de años y se las apañara para persistir a lo largo del tiempo sin cambios, como el celacanto, solapándose durante un tiempo con otras especies de *Homo* e incluso con *H. sapiens*. Quizás inventase algunas de las tradiciones culturales que, según los arqueólogos, se originaron con nuestra especie, afirma Berger. Y es posible que *H. naledi* se cruzara con nuestros antepasados y aportara ADN al acervo genético humano moderno, como los neandertales y los denisovanos.

IMPROPERIOS

Cuando el pasado septiembre el equipo anunció el descubrimiento con la publicación de sus artículos en *eLife*, el mundo se entusiasmó con *H. naledi*. Parece que no hubo medio de comunicación del planeta que no cubriese la noticia. Incluso la publicación satírica *The Onion* se subió al carro con una imagen retocada de un Berger lloroso bajo el titular «Antropólogos en lágrimas descubren cien mil años demasiado tarde un antepasado muerto del ser humano». Con todo, bajo esa oleada de entusiasmo público, parte de la élite paleoantropológica se encuentra descontenta. Nadie cuestiona que el hallazgo sea importante —una cueva llena de fósiles humanos es extraordinaria—, pero la forma en que el equipo ha recuperado, descrito e interpretado los huesos ha levantado sospechas.

No es la primera vez que Berger suscita miradas de reprobación entre sus colegas. Telegénico y de verbo fácil, se asoció con *National Geographic* al principio de su carrera. La relación trajo consigo financiación para investigaciones, su firma en artículos y apariciones en televisión. Pero había descubierto pocos fósiles, y sus escritos científicos y de divulgación recibieron acusaciones de falta de rigor y grandilocuencia por parte de las figuras más respetadas de la paleoantropología, entre ellas Tim White, de la Universidad de California en Berkeley, y Bernard Wood, de la Universidad George Washington.

El descubrimiento de *A. sediba* potenció el perfil científico de Berger. Incluso las voces más críticas admitieron que el hallazgo, que incluía dos esqueletos casi completos datados en 1,98 millones

de años, era espectacular. Pero muchos discrepaban de la manera de interpretarlo. Berger lleva mucho tiempo sosteniendo que se ha ignorado a Sudáfrica, en favor de África oriental, en la búsqueda del origen de *Homo*. *A. sediba,* con su mosaico de características de australopitecino y *Homo*, parecía ofrecer la posibilidad de establecer las raíces de *Homo* en Sudáfrica. El problema era que los fósiles más antiguos atribuidos a *Homo* eran especímenes del este de África anteriores a *A. sediba*. Berger arguyó que los fragmentos fósiles, como los atribuidos a los primeros *Homo*, ya no podían asignarse a un taxón u otro porque los esqueletos que él había descubierto, con su asombrosa combinación de características, mostraban que el todo no se infería de la parte. Sus colegas rechazaron en gran medida este planteamiento.

Con *H. naledi*, Berger redobló su presencia pública y reafirmó sus controvertidas ideas sobre el origen de *Homo* y los fósiles fragmentarios. Los críticos no tardaron en lanzar sus dardos. White declaró en *California*, la revista de la asociación de antiguos alumnos de su universidad, que los fósiles de Rising Star parecían los de un *H. erectus* primitivo, no los de una nueva especie. White es muy conocido por sus hallazgos de fósiles de homininos en Etiopía, como los de *Australopithecus garhi*, de 2,4 millones de años, que él y Berhane Asfaw, del Servicio de Investigación del Valle del Rift, y sus colaboradores atribuyeron, por el lugar y la época, a antepasados de *Homo*. Además, acusó al equipo de Rising Star de haber dañado fósiles durante la excavación y de apresurar la publicación de sus conclusiones. Más tarde, en una despectiva entrada de blog para *The Guardian*, White advertía de los peligros de mezclar ciencia y teatro: «Estamos asistiendo a la caída de áreas de la ciencia en la industria del espectáculo», escribió.

White no es el único que muestra preocupación. Carol Ward, de la Universidad de Misuri, advierte de que, aunque la cantidad de fósiles es asombrosa, se desconoce todavía su significado. Enfatiza la importancia de determinar la edad de los huesos: «Cuando sepamos su antigüedad podremos decir lo que significan para la evolución humana, pero no antes».

Ward también recela del artículo que describe los huesos. Alega que la información que ofrece sobre la comparación con otros fósiles relevantes no es suficiente para que los científicos que no pertenecen al equipo puedan evaluar muchas de las opiniones de este. Tampoco contiene el artículo un análisis filogenético (en esencia, un estudio donde un programa de ordenador compara rasgos en un grupo de organismos y, de este modo, reconstruye las relaciones evolutivas entre sus miembros), que podría revelar dónde encaja *H. naledi* en el árbol genealógico humano. «Parece haber un gran deseo [por parte de los autores] de que esté relacionado con los orígenes de *Homo*», observa, pero en ausencia de una filogenia detallada o una datación, no se puede saber si lo está.

Muchos siguen siendo fieles a la idea de que, basándose en los indicios actuales, *Homo* surgió en África oriental. En marzo del año pasado, meses antes de que salieran a la luz los detalles de *H. naledi*, Brian Villmoare, de la Universidad de Nevada en Las Vegas, Kaye Reed, de la Universidad estatal de Arizona, y sus colaboradores anunciaron el descubrimiento de un fragmento de mandíbula en el yacimiento de Ledi-Geraru, en el noreste de Etiopía. Afirman que es la muestra más antigua conocida de nuestro género. La mandíbula tiene sin duda marcas distintivas de *Homo*, observan, así como rasgos transicionales entre A*ustralopithecus* y *Homo*. En opinión de Reed, sin una datación, los fósiles de *H. naledi* no pueden desbancar la mandíbula de Ledi-Geraru como el indicio más antiguo de nuestro linaje. Tampoco acepta el argumento presentado por Berger, Hawks y sus colaboradores de que no es fiable asignar fragmentos aislados de la anatomía a uno u otro grupo taxonómico. «Yo tengo una datación, 2,8 millones de años, y hay características de *Homo*», mantiene.



APTA PARA MANIPULAR HERRAMIENTAS: La mano de *H. naledi* es la más completa que se conoce de una especie humana extinta.

Parte de la razón por la que los paleoantropólogos discrepan sobre qué fósiles son los que anuncian el origen de *Homo* radica en que, para empezar, no se ponen de acuerdo en qué consiste este género. *H. naledi* «hace más visible un debate en marcha sobre cómo hay que definir *Homo*, tanto para las cosas de las que solo tenemos fragmentos como para las que abundan más», comenta Susan Antón, de la Universidad de Nueva York, experta en los miembros más antiguos de nuestro género. Discernir entre *Homo* y *Australopithecus* resulta «complicado para todos en este momento, y cada uno tiene su filosofía sobre cómo hacer la distinción». Ella y sus colaboradores la han definido según las características del cráneo, los maxilares y los dientes. Otros sostienen que hay que basarse en los huesos de debajo de la cabeza —el poscráneo— porque son los que reflejan los mayores cambios adaptativos experimentados por los homininos en su transición desde los entornos boscosos a los abiertos. Pero estos huesos poscraneales son casi desconocidos para las primeras especies de *Homo*. Hay fósiles en Rising Star para empachar, destaca Antón. Pero la mezcla de rasgos aporta datos contradictorios, y el equipo de Berger no indicó explícitamente cómo define *Homo* y por qué. «Tenemos mucho de que hablar», afirma refiriéndose a su campo científico.

Pero que los restos de Rising Star constituyesen una nueva especie de *Homo* y resultaran tener más de dos millones de años no bastaría para persuadir a los escépticos de que *H. naledi* se encuentra en la línea que llega hasta nosotros o cerca de ella. Wood sospecha que los huesos representan una población residual cuyas peculiares características podrían haber evolucionado en relativo aislamiento. «Sudáfrica es un callejón sin salida al final del continente africano», afirma. «Mi tesis es que, con toda probabilidad, el intercambio de genes en ese callejón no fue tan

común como en África oriental, donde existe un mayor potencial para la homogeneización, con genes que entran por África meridional y central.» Wood señala a otra especie rara de *Homo* como ejemplo de población residual: *Homo floresiensis*, de cerebro y cuerpo reducidos, que persistió en la isla de Flores, en Indonesia, mucho después de que *H. sapiens* se originara en África.

También ha encontrado oposición la idea de que *H. naledi*, de cerebro pequeño, se deshiciera de sus muertos de modo ritual. «Sería muy radical», dice la arqueóloga Alison Brooks, de la Universidad George Washington. Según la opinión habitual, solo han recurrido a esta práctica los humanos anatómicamente modernos, de cerebro mucho más voluminoso, y quizá también los neandertales, y solo es común desde hace 100.000 años. «No quiero descartar por completo que [los investigadores de Rising Star] tengan razón, pero creo que se trata de algo tan insólito que se necesita un criterio más exigente para determinar qué cuenta como prueba.» Aunque solo sea por razones logísticas, hasta a algunos de los miembros del equipo del descubrimiento les costó aceptar la teoría de que *H. naledi* depositó deliberadamente sus muertos en esa cámara subterránea. «Es difícil entrar en ella con la mochila, no digamos ya arrastrar un cuerpo. Pero estuvimos dos años buscando una alternativa y no la encontramos», explica Elliot.

Aunque *H. naledi* realmente transportara a los muertos a la cámara, su comportamiento no necesariamente reflejaría complejidad cognitiva. Travis Pickering, de la Universidad de Wisconsin-Madison, que ha trabajado en la Cuna de la Humanidad durante veinte años, coincide en que la explicación más sensata de cómo llegaron los huesos a la remota cámara es que otros homininos los colocaran allí de forma intencionada. «Pero hoy en día no podemos saber si eso significa que *Homo naledi* era una especie avanzada culturalmente, que realizaba prácticas mortuorias desarrolladas, o si se trata simplemente de una especie atávica que tenía el buen juicio de no cohabitar con los cuerpos en descomposición», comenta.

LA MIRADA PUESTA EN EL PREMIO

Berger se defiende de sus detractores señalando que hacen sus comentarios solo en la prensa de divulgación y en los medios sociales, y no en el foro riguroso de una revista científica. «Sus pruebas solo llegan hasta sus labios», afirma. En Facebook ha defendido a ultranza el cuidado con el que su equipo excavó los fósiles y ha asegurado que los huesos ya estaban deteriorados cuando los encontraron los miembros del equipo de Rising Star. Berger atribuye el daño a las pisadas de espeleólogos aficionados desconocidos que habrían explorado la cueva antes que ellos. La razón por la que se pudieron extraer los huesos con rapidez, explica, fue que no se encontraron con los numerosos problemas que tienen otros equipos. En otros yacimientos, los fósiles suelen estar incrustados en la roca; por tanto, la excavación y limpieza de los huesos suele resultar sumamente laboriosa y lleva mucho tiempo. Pero en Rising Star se encontraban simplemente sobre la tierra húmeda y podían cepillarse con facilidad. Y, a diferencia de otros equipos que son reducidos y llevan a cabo su investigación en lugares lejanos durante seis u ocho semanas al año, el grupo de Berger es numeroso y está ubicado en Johannesburgo, así que puede trabajar en el yacimiento o en el gabinete en cualquier momento. Si se calcula el trabajo en Rising Star por las horas-persona invertidas entre el descubrimiento y la publicación, es el mismo que dedican los demás, insiste.

Refiriéndose a la idea de White de que los fósiles pertenecen a un *H. erectus* primitivo y no a una nueva especie, Berger replica con sorna: «Discrepa de todo, menos de aquello a lo que él mismo le ha puesto nombre». Atribuir los restos de *H. naledi* a *H. erectus* significaría que este presentaba más variedad que la observada en nuestra propia especie, lo cual es improbable desde su punto de vista. Más relevante es que *H. naledi* posee rasgos únicos no observados en ningún otro hominino. «Si vamos a ser biólogos evolutivos, aquí se acaba la discusión», profiere. «Con franqueza, me sorprende que no estén diciendo que es un nuevo género» en vez de solamente una nueva especie.

Preguntado por la datación de los fósiles de Rising Star, Berger asegura que los geólogos están trabajando en ello y que al final darán con la fecha. Pero mantiene que la datación no cambiará su opinión sobre el parentesco que une los restos de *H. naledi* con otros miembros de la familia humana. Aunque *H. naledi* posee algunos rasgos clave de *Homo*, el conjunto es en algunos aspectos más primitivo que *H. habilis* y que la mandíbula de Ledi-Geraru, que hoy ostenta el título de fósil de *Homo* más antiguo. Sea cual sea la edad que resulten tener los fósiles de Rising Star, de ellos se infiere que la rama de *H. naledi* en el árbol genealógico brotó antes que las otras; y si los fósiles son jóvenes, es porque representan una población más tardía de esta especie.

¿Por qué, entonces, el equipo no incluyó una filogenia en el artículo que anunciaba que los huesos pertenecían a una nueva especie? Para entender cómo están relacionados los organismos entre sí, los biólogos evolutivos usan un método denominado cladística, que cataloga los taxones en grupos según las características novedosas que comparten con su último antepasado común pero no con los anteriores a este. La pega es que el método funciona mejor cuando las características son observables en todos los organismos en cuestión.

Pero, cuando se trata de fósiles, cumplir con ese requisito es más fácil en la teoría que en la práctica, ya que los rasgos que preservan varían muchísimo. En paleoantropología se tiende a basar los análisis cladísticos en rasgos encontrados en el cráneo y los dientes. El cráneo, porque siempre se ha pensado que era particularmente útil para definir especies, ya que su morfología varía mucho entre los homininos; y los dientes, porque son los elementos más comunes en los registros fósiles de los homininos. Los huesos del resto del esqueleto no se encuentran siempre asociados a cráneos o a dientes; por tanto, puede resultar difícil atribuirlos a una especie que está clasificada según restos craneales o dentales. Además, un elemento del esqueleto que se conoce en una especie a menudo falta en otra.

De hecho, algunos de los elementos clave de *H. naledi* —incluidos sus casi completos conjuntos de huesos de mano y pie— tan solo se encuentran de forma parcial en el registro fósil de otras especies de *Homo*, como *H. erectus* y *H. habilis*, o ni eso. A falta de partes correspondientes con las que comparar, no se pudo realizar un análisis cladístico de *H. naledi* que tuviera en cuenta sus muchos rasgos poscraneales de interés. Sin poder contar con este método de comparación, se realizó un análisis basado en rasgos craneales y dentales. Pero algunos de los resultados del test no tenían sentido: indicaban que *H. naledi*, con sus numerosos rasgos primitivos, estaba más emparentado con *H. sapiens* que con *H. erectus*, mucho más antiguo. Para Berger, eso subraya que los árboles genealógicos basados en datos de una sola región anatómica, como la cabeza o los dientes, son poco fiables.

Berger está seguro de que *H. naledi* revolucionará de una forma u otra el conocimiento de la evolución humana. Pero no espera que sus colegas confíen solo en su palabra. Apartándose

del modo usual de obrar en paleoantropología, que cuenta con una reputación de secretismo en lo que se refiere al acceso a los fósiles, ha instaurado con los restos de Rising Star la política explícita de ponerlos a disposición de cualquier investigador que solicite verlos. Y el día que sacaron los artículos en *eLife*, el equipo hizo públicos gratuitamente barridos tridimensionales de huesos característicos en MorphoSource, un repositorio digital de datos anatómicos que permite al usuario imprimir tridimensionalmente sus propias réplicas de los especímenes. La resolución de los datos todavía no es tan alta como para llevar a cabo una investigación original, pero basta para comprobar lo que el equipo defiende», sostiene Berger.

«Que la gente tenga libre acceso no puede ser más positivo; las quejas solo son ruido», observa David Strait, de la Universidad Washington en San Luis. Asimismo, menciona que, en el año 2000, White escribió un destacado editorial en el que aseveraba que, dado el vivo interés público por los orígenes humanos, los paleoantropólogos tienen especialmente el deber de acertar. «Eso es del todo erróneo» asegura Strait. «Por supuesto que debemos intentar que las cosas estén bien hechas, pero la ciencia tiene que actuar mediante la refutación de posibilidades. Reducimos las posibles verdades para entender mejor lo que ocurrió en el pasado, y siempre existe la posibilidad de que surja nueva información que cambie las ideas de todos.» Al hacer que otros investigadores tengan acceso a los fósiles, asegura Strait, Berger ha ofrecido a los científicos que discrepan de él una vía para que contrasten las ideas de unos y otros: «Esta disciplina progresa solo si se puede estudiar el material».

Mientras tanto, con o sin la aprobación de los discrepantes, el trabajo avanza deprisa en Rising Star. Los geólogos reconstruyen la historia de la cueva, los excavadores sacan más fósiles de la cámara, los biólogos moleculares intentan extraer el ADN de los huesos y los cazadores de fósiles buscan nuevas pistas. «[*Homo naledi*] debería poner en marcha la época de exploración más grande de todos los tiempos», declara Berger con su entusiasmo característico. Si no es así, quizá lo logre el próximo descubrimiento del equipo, porque el investigador revela que sus exploradores ya han hecho nuevos progresos en ese frente. Presionado para que cuente más detalles, se muestra reacio; tan solo dice con una sonrisa maliciosa que han encontrado más de un sitio nuevo que le ha acelerado el corazón, como le ocurrió con Rising Star cuando vio por primera vez esas fotografías borrosas. El espectáculo continuará. IyC

PARA SABER MÁS

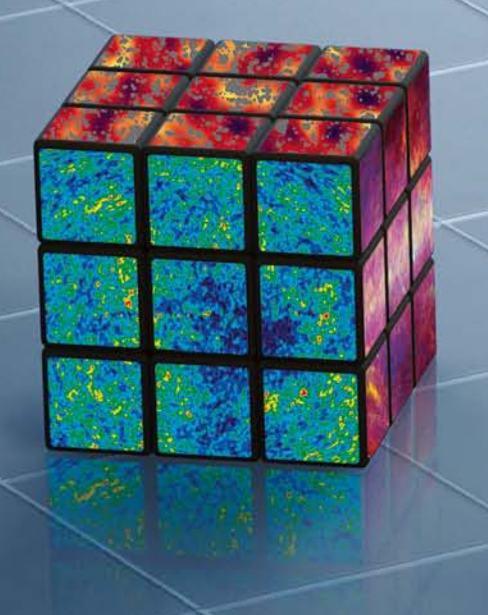
***Homo naledi*, a new species of the genus *Homo* from the Dinaledi Chamber, South Africa.** Lee R. Berger y otros en *eLife*, art. n.º 09560. Publicado en línea el 10 de septiembre de 2015.

Geological and taphonomic context for the new hominin species *Homo naledi* from the Dinaledi Chamber, South Africa. Paul H. G. M. Dirks y otros en *eLife*, art. n.º 09561. Publicado en línea el 10 de septiembre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

El origen del género *Homo*. Kate Wong en *IyC*, junio de 2012.

Cincuenta años de *Homo habilis*. Bernard Wood en *IyC*, octubre de 2014.



COSMOLOGÍA

El rompecabezas de la energía oscura

¿Por qué se acelera la expansión del universo? Tras dos décadas de estudio, la respuesta sigue siendo igual de enigmática, pero las preguntas están cada vez más claras

Adam G. Riess y Mario Livio

El universo aumenta de tamaño cada segundo que pasa. Las galaxias se apartan unas de otras, los cúmulos de galaxias se alejan de los demás cúmulos, y el espacio que media entre todos los objetos crece sin cesar. Este fenómeno se conoce desde los años veinte del siglo pasado, cuando las observaciones de Edwin Hubble y otros astrónomos pusieron de manifiesto que el universo se expande. Pero, desde hace dos décadas, sabemos que ese proceso se está acelerando: el universo se hincha a una velocidad cada vez mayor; es decir, las galaxias se alejan unas de otras más rápido en este instante que hace un momento.

KENN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS





Adam G. Riess es astrofísico de la Universidad Johns Hopkins y del Instituto para la Ciencia del Telescopio Espacial (STScI), el centro de operaciones del telescopio Hubble. En 1998, su trabajo sobre supernovas distantes demostró la expansión acelerada del universo, hallazgo por el que en 2011 recibió el premio Nobel de física.

Mario Livio ha trabajado durante 24 años en el STScI. Es autor de conocidos títulos de divulgación científica; entre ellos, *La proporción áurea* (Ariel, 2006) y *Errores geniales que cambiaron el mundo* (Ariel, 2013).

Esa fue la sorprendente conclusión a la que uno de nosotros (Riess), al mando de un equipo coliderado por Brian Schmidt, de la Universidad Nacional de Australia, llegó en 1998 a partir de observaciones de supernovas lejanas. El hallazgo concordaba con los resultados de otra colaboración, encabezada por el investigador de la Universidad de California en Berkeley Saul Perlmutter, basados en un método similar y obtenidos el mismo año. La conclusión era inevitable: por alguna razón, la expansión del universo procede cada vez más deprisa. Pero ¿por qué?

Se suele utilizar el término «energía oscura» para denominar el agente responsable de la fuerza repulsiva que, aparentemente, está desgarrando el universo. Pero, tras estudiar el problema durante veinte años, la naturaleza física de la energía oscura continúa envuelta en el mismo halo de misterio que al principio. De hecho, las últimas observaciones solo parecen complicar más la situación, al mostrar cierta tensión con la teoría más aceptada.

Hoy seguimos sin conocer la respuesta a varias preguntas de primer orden. ¿Qué es la energía oscura? ¿Por qué parece ser muchísimo más débil de lo que cabría esperar según las teorías más simples (pero, al mismo tiempo, lo suficientemente intensa para detectarla)? ¿Cómo afectará al destino del cosmos? Y, por último, ¿indican sus extrañas propiedades que nuestro universo adquirió sus características de manera aleatoria? ¿Que, en realidad, el cosmos que conocemos no es más que uno entre un conjunto innumerable de ellos, cada uno con diferentes propiedades y con distintos valores de la intensidad de la energía oscura? En definitiva, ¿es nuestro universo parte de un gigantesco multiverso?

En los próximos años, varios proyectos observacionales intentarán identificar la naturaleza de la energía oscura. Las expectativas de que varios de ellos logren avances significativos a corto plazo son bastante optimistas. Puede que durante la próxima década comencemos a dar respuesta a las preguntas anteriores; de lo contrario, tal vez tengamos que resignarnos a vivir con algunas de ellas durante un tiempo indefinido.

¿QUÉ ES LA ENERGÍA OSCURA?

Se han propuesto varias hipótesis para explicar qué podría estar acelerando la expansión del universo. La idea más popular hasta la fecha se encuentra asociada a la naturaleza del espacio vacío. Según las leyes cuánticas, el vacío no es «la nada», sino un hervidero de partículas y antipartículas «virtuales» que, continuamente, aparecen de manera espontánea para aniquilarse una fracción de segundo después. Por extraño que parezca, este mar de partículas efímeras comporta energía. Y la energía, al igual que la masa, es responsable de la gravedad. Sin embargo, a diferencia de la masa, la energía puede dar lugar a una fuerza de la gravedad tanto atractiva como repulsiva, dependiendo de si la presión que ejerce es positiva o negativa. De acuerdo con las teorías al uso, la energía asociada al espacio vacío debería producir una presión negativa, por lo que podría actuar como fuente de la gravedad repulsiva que acelera la expansión del universo.

Esta idea resulta equivalente a la constante cosmológica, un término introducido por Albert Einstein en las ecuaciones de su teoría de la relatividad general. Tal y como indica su nombre, esta hipótesis da por sentado que la densidad de energía oscura permanece constante; es decir, que adopta el mismo valor a lo largo del tiempo y a través del espacio. Hasta ahora, los indicios astrofísicos de los que disponemos se ajustan a la explicación de la energía oscura basada en la constante cosmológica, si bien existen algunas discrepancias.

Por otro lado, la energía oscura podría deberse a un campo de energía al que los expertos han dado en llamar «quintaesencia». Dicho campo impregnaría todo el universo y, en cada punto del espacio, ejercería un efecto que contrarrestaría la atracción gravitatoria. Los físicos están habituados al concepto de campo: el electromagnetismo y la gravedad actúan por medio de ellos, si bien suelen surgir de fuentes localizadas en lugar de estar distribuidos por todo el espacio.

Si la energía oscura fuese un campo, no tendría por qué permanecer constante, sino que podría cambiar con el tiempo. En tal caso, en el pasado tal vez haya sido más intensa o más débil que en la actualidad, por lo que habría ejercido un efecto diferente sobre el universo en distintas épocas cósmicas. De igual modo, tanto su intensidad como su impacto sobre la evolución del cosmos podrían verse alterados en el futuro. En una de las versiones de esta teoría, apodada «de campo congelado», la energía oscura evoluciona cada vez más despacio a medida que pasa el tiempo; en la variante «de deshielo», el campo varía lentamente al principio y más rápido después.

Por último, una tercera opción es que no exista ninguna energía oscura. La aceleración cósmica podría deberse a fenómenos físicos que no tienen cabida en la teoría de la gravedad de Einstein. Tal vez a escalas verdaderamente extremas, como las asociadas a los cúmulos de galaxias o a la totalidad del universo observable, las leyes de la gravedad funcionen de manera diferente a como predice la relatividad general. Se han propuesto

EN SÍNTESIS

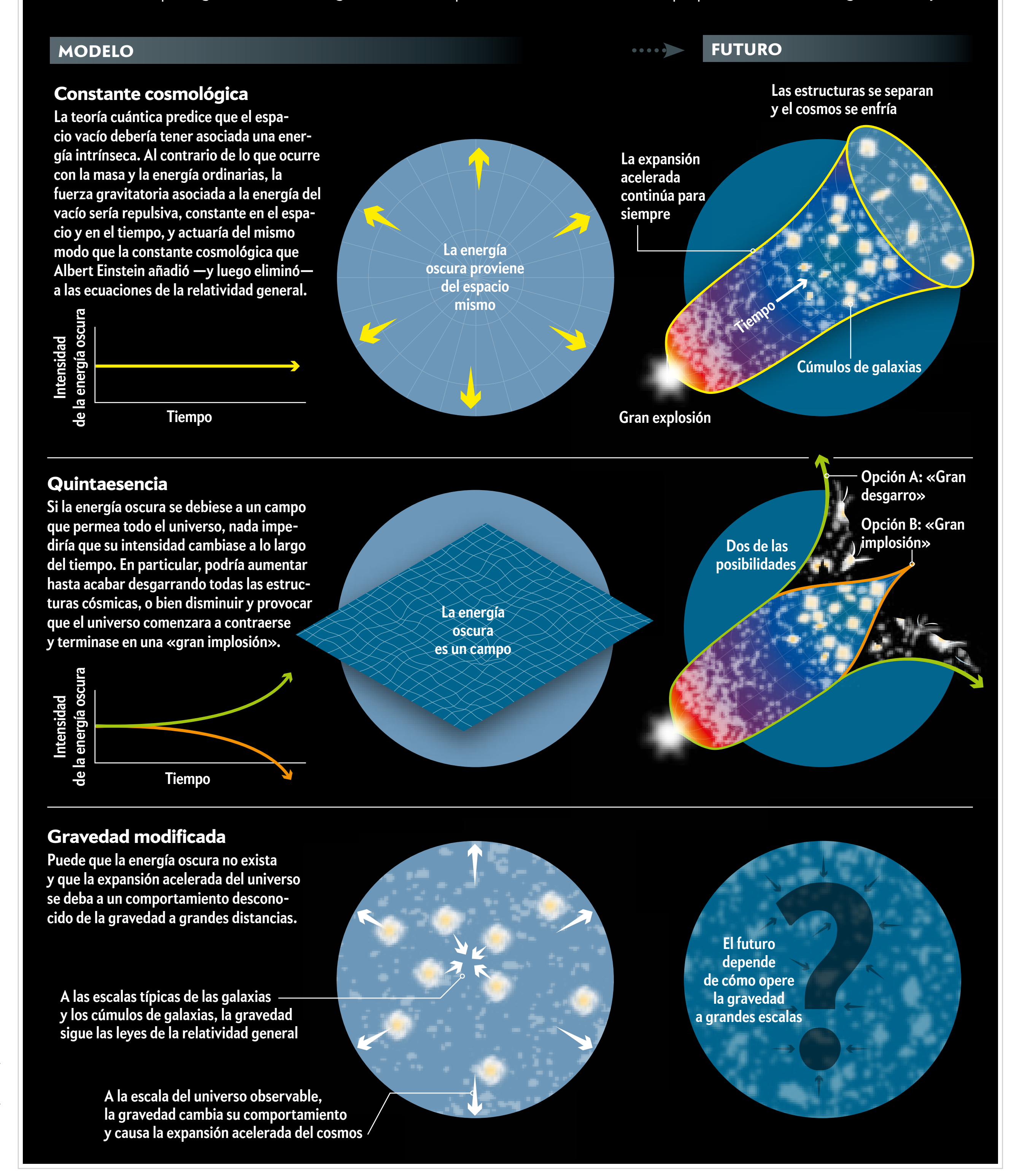
En 1998, los astrónomos descubrieron que la expansión del universo se estaba acelerando. El misterioso agente responsable de dicho fenómeno se conoce con el nombre de «energía oscura».

La energía oscura conduce a varios interrogantes de primer orden. ¿Por qué su intensidad resulta tan inexplicablemente pequeña? ¿Apunta el fenómeno a la existencia de un multiverso?

Gracias a varios experimentos en marcha y a otros que comenzarán a operar en breve, los físicos albergan la esperanza de obtener las primeras respuestas durante la próxima década.

La energía oscura y el futuro del universo

«Energía oscura» es el término con el que los físicos se refieren a cualquiera que sea el agente responsable de la expansión acelerada del cosmos. Las hipótesis para explicar el fenómeno pueden clasificarse en tres grandes categorías. Por un lado, podría tratarse de una energía constante asociada al espacio vacío (la constante cosmológica, *arriba*), o bien de una energía variable ligada a un campo que impregnaría todo el universo (la quintaesencia, *centro*). Por otro, tal vez la energía oscura no exista y la aceleración cósmica se deba a que, a grandes escalas, la gravedad se comporta de un modo distinto del que predice la relatividad general (*abajo*).



NIGEL HAWTIN (*ilustración*)

varias sugerencias interesantes en esta línea, pero, hasta ahora, nadie ha logrado formular una teoría coherente que dé cuenta de todas las observaciones disponibles. Así que, por el momento, parece que la hipótesis de la energía oscura le lleva cierta ventaja a esta última opción. (Otras ideas, como que la aceleración cósmica se deba a una distribución heterogénea de la materia en el universo o a una red de configuraciones geométricas inusuales en la estructura del espacio, se han demostrado en gran medida incompatibles con los datos observacionales.)

¿POR QUÉ LA ENERGÍA OSCURA ES TAN DÉBIL?

Ninguna de las explicaciones propuestas resulta enteramente satisfactoria. En primer lugar, la descripción basada en la constante cosmológica predice que la energía oscura debería ser muchísimo más intensa de lo que es. Si sumamos las contribuciones de todos los estados que se suponen asociados al mar de partículas y antipartículas virtuales que llenan el vacío cuántico, obtendremos un valor 120 órdenes de magnitud superior al observado. Si tomamos en consideración hipótesis adicionales, como las que imponen las teorías supersimétricas (las cuales postulan que, por cada tipo de partícula conocida, debería existir una «supercompañera» más masiva aún por descubrir), la discrepancia se reduce hasta cierto punto, pero el valor predicho para la energía total sigue siendo decenas de órdenes de magnitud mayor que el medido. Por tanto, si la explicación de la energía oscura reside en la energía del vacío, la verdadera pregunta es por qué esta toma un valor tan asombrosamente pequeño.

La descripción de la energía oscura en términos de un campo apenas sale mejor parada en este aspecto. Simplemente se da por hecho —sin ningún buen argumento que lo justifique— que el mínimo de la energía potencial asociada al campo de la energía oscura adopta un valor muy reducido, lo que garantiza que solo una pequeña cantidad de energía oscura se encuentra distribuida por todo el espacio. Además, estos modelos requieren que dicho campo interaccione sorprendentemente poco con todo lo que hay en el universo (a excepción del efecto causado por la gravedad repulsiva), una cualidad difícil de explicar. Todo ello hace que resulte complicado incorporar de manera natural el campo responsable de la energía oscura a los modelos de física de partículas.

¿QUÉ IMPLICA PARA EL FUTURO DEL COSMOS?

Las propiedades de la energía oscura determinarán el destino del universo. Si, por ejemplo, el fenómeno se debe a la energía del vacío, la aceleración continuará eternamente. Eso significa que, dentro de un billón de años, la expansión habrá provocado que todas las galaxias que hoy se encuentran más lejos de la Vía Láctea que sus vecinas más próximas (las que integran el Grupo Local, que para entonces se habrán fusionado entre sí para formar una galaxia elíptica gigante) se separarán de nosotros a tal velocidad que su luz ya nunca podrá alcanzarnos, por lo que se tornarán completamente indetectables. Incluso el fondo cósmico de microondas, la luz primigenia originada en el crepúsculo de la gran explosión y que hoy llena todo el espacio, se habrá dilatado hasta tal punto que su longitud de onda será mayor que el universo observable, por lo que también se volverá imperceptible. De ser el caso, tendríamos la suerte de estar viviendo en una época cósmica privilegiada, en la que aún podemos gozar de una de las mejores vistas posibles del universo [*véase* «¿El fin de la cosmología?», por Lawrence Krauss y Robert Scherrer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 2008].

Por otro lado, si la energía oscura no estuviera asociada a la energía del vacío, sino a la de un campo de origen desconocido, el futuro quedaría completamente abierto. Dependiendo de la forma en que evolucionase dicho campo, podría llegar un momento en que el universo dejara de expandirse y comenzara a contraerse hasta culminar en una «gran implosión» (*big crunch*), una especie de versión invertida de la gran explosión con la que nació. Pero también podría ocurrir que terminase sufriendo un «gran desgarro» (*big rip*), en el que todas las estructuras complejas, desde los cúmulos de galaxias hasta los átomos o incluso los núcleos atómicos, llegaran a despedazarse por efecto de la fuerza repulsiva. Y, por supuesto, un campo de energía oscura también deja la puerta abierta a la primera posibilidad: una aceleración continua que conduciría a la muerte térmica del universo.

Por último, una teoría alternativa de la gravedad, en caso de que se demostrase necesaria, podría dar lugar a todo tipo de desenlaces en función de sus características particulares.

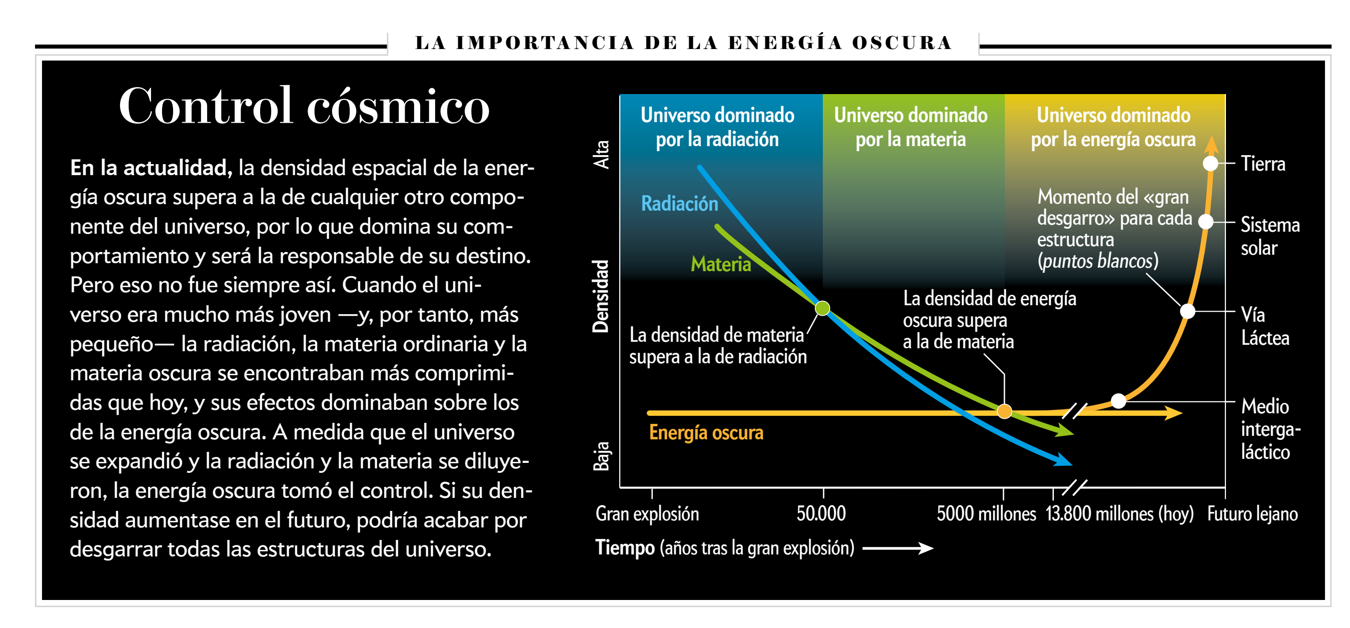
¿PODRÍAMOS VIVIR EN UN MULTIVERSO?

Con la constante cosmológica a la cabeza de las posibles explicaciones teóricas, la cuestión de por qué esta adopta un valor

LA IMPORTANCIA DE LA ENERGÍA OSCURA

Control cósmico

En la actualidad, la densidad espacial de la energía oscura supera a la de cualquier otro componente del universo, por lo que domina su comportamiento y será la responsable de su destino. Pero eso no fue siempre así. Cuando el universo era mucho más joven —y, por tanto, más pequeño— la radiación, la materia ordinaria y la materia oscura se encontraban más comprimidas que hoy, y sus efectos dominaban sobre los de la energía oscura. A medida que el universo se expandió y la radiación y la materia se diluyeron, la energía oscura tomó el control. Si su densidad aumentase en el futuro, podría acabar por desgarrar todas las estructuras del universo.



JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

tan inexplicablemente pequeño resulta de particular interés. Antes incluso de que se descubriese la expansión acelerada del universo, Steven Weinberg, físico teórico y premio nóbel de la Universidad de Texas en Austin, ya se percató de que la constante cosmológica planteaba este problema. Para resolverlo, propuso un nuevo paradigma: uno en el que dicha constante no se encuentra determinada de manera unívoca por las leyes fundamentales de la naturaleza, sino que se comporta como una variable aleatoria que toma valores diferentes en los distintos miembros de un conjunto inmenso de universos. Algunos de ellos presentarían una constante cosmológica muy elevada, pero entonces la fuerza repulsiva sería tan intensa que la materia no habría tenido tiempo de agruparse para formar galaxias, planetas ni vida. Y, dado que existimos, habremos de encontrarnos en un universo que permita nuestra existencia: uno en el que la constante cosmológica tome un valor lo suficientemente bajo [*véase* «La vida en el universo», por Steven Weinberg; Investigación y Ciencia, diciembre de 1994]. Esta línea de razonamiento, que más tarde sería desarrollada por Alexander Vilenkin, de la Universidad de Tufts; Martin Rees, de la Universidad de Cambridge; uno de nosotros (Livio) y otros investigadores, ha sido bautizada como «principio antrópico».

Además de la energía oscura, existen buenas razones para pensar en un multiverso. La teoría de la inflación cósmica, hoy ampliamente aceptada, postula que el cosmos experimentó una expansión descomunal durante su primera fracción de segundo. Hace unos años, Vilenkin y Andréi Linde, de Stanford, demostraron que, una vez que la inflación se pone en marcha, resulta prácticamente imposible impedir que ocurra una y otra vez. Como consecuencia, el proceso acaba creando un conjunto infinito de «burbujas», o «universos bolsa», que nacerían aislados unos de otros y que podrían exhibir propiedades muy diferentes [*véase* «El universo inflacionario autorregenerante», por Andréi Linde; Investigación y Ciencia, enero de 1995].

El multiverso también parece ser una de las consecuencias de la teoría de cuerdas, una de las candidatas a proporcionar una descripción unificada de todas las interacciones de la naturaleza. Algunos cálculos realizados por Raphael Bousso y Joseph Polchinski, ambos de la Universidad de California, sugieren que la teoría de cuerdas permitiría la existencia de hasta 10^{500} universos posibles, cada uno caracterizado por distintos valores de las constantes de la naturaleza e, incluso, por un número diferente de dimensiones espaciales [*véase* «El paisaje de la teoría de cuerdas», por Raphael Bousso y Joseph Polchinski; Investigación y Ciencia, noviembre de 2004].

Ello no obstante, la sola mención del multiverso pone los pelos de punta a más de un físico. La idea no resulta fácil de digerir, y no digamos ya de demostrar, por lo que podría significar el fin del método científico tal y como lo conocemos, el cual requiere que las hipótesis científicas puedan ponerse a prueba mediante experimentos u observaciones. Con todo, la idea del multiverso sí hace algunas predicciones que quizá puedan contrastarse algún día. En concreto, hay modelos del multiverso que indican que la geometría del espaciotiempo debería comportar una ligera curvatura que tal vez quepa detectar por medio de las observaciones. Otra posibilidad, aunque no muy esperanzadora, es que el fondo cósmico de microondas presente ciertas deformaciones como consecuencia de la colisión entre nuestro universo y otro universo burbuja.

EN BUSCA DE RESPUESTAS

El mejor método que conocemos para investigar la naturaleza de la energía oscura consiste en medir el cociente entre su presión (la tensión que genera sobre el espacio) y su densidad (cuánta energía hay por unidad de volumen), una cantidad conocida como parámetro de la ecuación de estado, w. Si la energía oscura se debiese a la energía del vacío (la constante cosmológica), w debería ser constante e igual a -1. Si, por el contrario, estuviera asociada a un campo que varía con el tiempo, podríamos observar un valor de w distinto de -1 y que, además, ha cambiado a lo largo de la historia cósmica. Por último, si la aceleración cósmica implicase una modificación de la teoría de la gravedad de Einstein a distancias extremas, esperaríamos observar desajustes entre los valores de w obtenidos en distintas escalas cósmicas.

Se han ideado algunos procedimientos muy ingeniosos para medir de manera indirecta la presión y la densidad de la energía oscura. Dado su carácter repulsivo, tanto la energía oscura como una gravedad modificada tenderían a contrarrestar la fuerza atractiva de la gravedad ordinaria, por lo que se opondrían a la formación de cúmulos de galaxias. Por tanto, al estudiar el crecimiento de los cúmulos galácticos en función del tiempo, puede inferirse la intensidad de la energía oscura en distintas etapas de la historia cósmica. Esto puede lograrse analizando la manera en que la masa de un cúmulo curva los rayos de luz procedentes de galaxias lejanas situadas detrás de él, un fenómeno conocido como lente gravitatoria. La magnitud de esa deflexión revela la masa del cúmulo, y la observación de este efecto en grupos de galaxias situados a distancias diferentes permite medir la abundancia de cúmulos masivos en distintas épocas del cosmos. (Debido al tiempo que tarda la luz en llegar hasta nosotros, observar objetos más y más lejanos equivale a remontarse a un pasado cada vez más remoto.)

Otra manera de investigar la energía oscura se basa en estudiar cómo ha cambiado la tasa de expansión del universo a lo largo de su historia. Al observar objetos a diferentes distancias y medir su desplazamiento hacia el rojo (el estiramiento de la longitud de onda de la luz debido a la expansión del espacio), podemos averiguar cuánto se ha agrandado el universo desde el momento en que la luz procedente de esos objetos comenzó a viajar hacia nosotros. De hecho, este método fue el que permitió descubrir que la expansión del universo se estaba acelerando. Los dos equipos autores del hallazgo midieron los desplazamientos hacia el rojo de varias supernovas de tipo Ia, una clase de explosiones estelares cuya distancia puede estimarse de manera fiable a partir de su brillo. Una variante de esta técnica consiste en observar el tamaño aparente de ciertas ondulaciones en la densidad de galaxias en el espacio, conocidas como oscilaciones acústicas bariónicas (otro indicador

Reconstruir la historia del universo

El sondeo PAU de energía oscura medirá con gran precisión la distancia y el desplazamiento al rojo de millones de galaxias

ENRIQUE FERNÁNDEZ

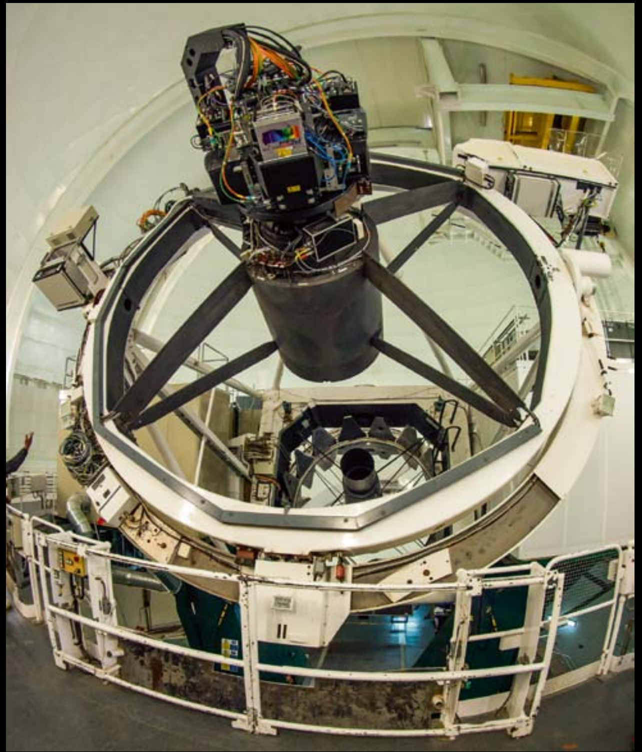
¿Existe el universo desde siempre o tuvo un comienzo? ¿Seguirá existiendo eternamente o tendrá un final? Todas las civilizaciones han dado alguna respuesta a estas preguntas, en general en el ámbito de sus religiones. Sin embargo, pocos científicos se han atrevido a planteárselas y menos aún han osado aventurar una respuesta.

En el ámbito de la ciencia, durante el siglo pasado se llegó a la conclusión de que el universo —finito o infinito, eterno o no— se expande. Pero, dado que la gravedad tiende a frenar la expansión cósmica, la pregunta era si dicho proceso se detendría algún día y el universo comenzaría a contraerse, o si, por el contrario, seguiría expandiéndose para siempre, aunque cada vez más despacio. La pregunta tenía sentido y el marco científico en que se formulaba se entendía bien, por lo que numerosos grupos de investigación en todo el mundo intentaron dar con una respuesta.

En 1998, dos equipos independientes efectuaron un descubrimiento inesperado: el universo no solo se expandía, sino que lo hacía cada vez más deprisa. El fenómeno superaba el marco científico antes mencionado y condujo a la hipótesis de que, además de materia y radiación, el cosmos se encuentra impregnado de un componente con la peculiar propiedad de ejercer una presión negativa. El efecto de esta presión es contrario al de la gravedad, por lo que, si domina sobre ella, provocará que la expansión se acelere. Dicho componente recibe el nombre de energía oscura. Pero ¿qué es? Riess y Livio la describen con gran acierto: un rompecabezas cuyas posibles soluciones encierran profundas implicaciones para la física fundamental.

Como siempre ocurre con los grandes descubrimientos, el de la energía oscura generó un gran interés. Debido en parte a este sorprendente hallazgo y a una serie de avances técnicos notables, los últimos años han conocido el auge de una disciplina, nueva en cierto modo, a la que hemos dado en llamar «cosmología observacional».

En 1998 ya existían en España algunos grupos que trabajaban en este campo; en particular, en el estudio de las propiedades del fondo cósmico de microondas. En 2007, con ocasión de un programa especial del entonces Ministerio de Educación y Ciencia, el programa Consolider, algunos de nosotros creímos llegado el momento de plantear en nuestra comunidad un proyecto competitivo en cosmología observacional. Bautizado con el nombre de PAU, siglas en inglés de Física del Universo Acelerado, la idea contemplaba la construcción de una cámara capaz de medir con gran precisión el desplazamiento al rojo de un gran número de galaxias distantes. En general, las correlaciones entre desplazamiento al rojo y distancia permiten reconstruir la historia de la expansión del universo y, con ello, analizar las propiedades de la energía oscura a lo largo del tiempo.



LA CÁMARA PAUCam instalada en el foco del telescopio William Herschel, en la isla de La Palma.

CORTESÍA DEL PROYECTO PAU

Cincuenta mil galaxias por noche

En 2009 comenzamos a diseñar PAUCam, la cámara del proyecto. El énfasis se puso en que el instrumento pudiese medir con gran precisión y eficiencia el desplazamiento al rojo de galaxias muy lejanas. Instalada en el telescopio William Herschel del Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma, la cámara fue probada con éxito en junio del año pasado.

fiable de distancias cósmicas), para reconstruir la historia de la expansión del universo.

Hasta hoy, la mayoría de las estimaciones de *w* han resultado compatibles, dentro de los márgenes de error observacionales, con un valor de –1 con una precisión del orden del 10 por ciento, por lo que apoyan la explicación de la energía oscura basada en la constante cosmológica. Hace poco, un equipo liderado por Riess empleó el telescopio espacial Hubble para reconstruir mediante la técnica de las supernovas el comportamiento de la energía oscura durante los últimos 10.000 millones de años (la edad actual del universo se estima en unos 13.800 millones de años) y no halló ningún indicio de variación a lo largo de todo ese tiempo.

Con todo, hemos de destacar que, en los últimos años, también se han obtenido algunos resultados que apuntan a posibles desviaciones con respecto a las predicciones basadas en la constante cosmológica. Por ejemplo, las medidas del fondo de microondas efectuadas por el satélite Planck, de la ESA (las cuales dan información sobre la masa y la energía totales del universo), combinadas con estudios del efecto de lente gravita-

PAUCam puede fotografiar galaxias cuya luz partió de ellas cuando el universo observable tenía un tamaño menor que la mitad del actual. Las medidas del desplazamiento al rojo se efectúan mediante múltiples imágenes tomadas con filtros distintos, cada uno de los cuales solo deja pasar un color concreto. Esta técnica se denomina fotométrica. La alternativa, empleada en muchos otros instrumentos, consiste en analizar la luz por medio de un espectrógrafo. Ambas presentan sus ventajas e inconvenientes. Lo que distingue a PAUCam de otros proyectos es, por un lado, su capacidad para medir los desplazamientos al rojo con mayor precisión que los instrumentos fotométricos actuales; por otro, su facultad para observar una densidad de objetos mayor que los experimentos espectroscópicos en funcionamiento. En principio, PAUCam puede tomar datos de unos 50.000 objetos por noche repartidos en una zona de dos grados cuadrados.

Las imágenes se forman cuando la luz llega a los sensores CCD del instrumento, los cuales convierten la radiación en una carga eléctrica que es leída desde el exterior. PAUCam cuenta con 18 sensores CCD de 2048 × 4096 píxeles, por lo que genera imágenes de 150 megapíxeles: una resolución superior a la de una cámara digital ordinaria, pero no mucho mayor. Sin embargo, su rasgo distintivo es el bajo ruido asociado a esos píxeles; es decir, la señal que generan los sensores en ausencia de luz. En PAUCam, dicha señal equivale a 5 electrones, una carga ínfima. Para lograrlo, los sensores deben mantenerse en el vacío y a una temperatura de 100 grados Celsius bajo cero.

Uno de los objetivos del proyecto, además del puramente científico, era diseñar y construir el instrumento en el seno de nuestra comunidad investigadora. La experiencia en grandes proyectos internacionales indica que existe una correlación muy fuerte entre la propiedad intelectual del instrumento y el liderazgo científico posterior. También estábamos convencidos de la importancia de desarrollar la tecnología necesaria en nuestros grupos de investigación. Para ello, nada mejor que enfrentarse a un reto de estas características.

Han pasado cinco años desde que el proyecto PAU iniciase su andadura. Ahora, el objetivo consiste en acumular los datos suficientes para medir los efectos de la energía oscura en el universo. Para esta fase del proyecto, a los cinco grupos originales de Barcelona (el Instituto de Ciencias del Espacio, el Instituto de Física de Altas Energías y el Puerto de Información Científica) y Madrid (el CIEMAT y el Instituto de Física Teórica) que construyeron la cámara se han unido dos del Reino Unido, uno de Holanda y otro de Suiza para realizar las observaciones y analizar los resultados. El proyecto ya está en marcha.

***Enrique Fernández** es catedrático de la Universidad Autónoma de Barcelona, investigador del Instituto de Física de Altas Energías y uno de los fundadores del proyecto PAU.*

toria, parecen indicar que el valor de w podría ser menor que –1. Los datos del Telescopio de Sondeo Panorámico y Sistema de Respuesta Rápida (Pan-STARRS, por sus siglas en inglés), que ha usado más de 300 supernovas para reconstruir la expansión del cosmos, también concluyeron que el valor de w podría estar por debajo de –1. Y ciertas observaciones recientes de las oscilaciones acústicas bariónicas extraídas a partir de datos de cuásares (galaxias brillantes muy lejanas) aportan indicios de que la densidad de energía oscura podría haber aumentado con el tiempo. Por último, una pequeña discrepancia entre el ritmo al que se expande el universo en la actualidad y la tasa de expansión primordial determinada a partir del fondo de microondas podría estar apuntando a una explicación de la energía oscura distinta de la constante cosmológica. No obstante, por muy intrigantes que sean todos estos indicios, por el momento ninguno de ellos resulta convincente. Los datos que obtengamos en el futuro cercano podrían reafirmar estas anomalías, pero también demostrar que no eran más que fluctuaciones sistemáticas.

En estos momentos, los investigadores trabajan para incrementar en un factor 100 la precisión de las medidas relacionadas con la energía oscura. Se espera que los resultados lleguen a lo largo de la próxima década. Nuevos proyectos, como el Sondeo de la Energía Oscura (DES), que comenzó a tomar datos en 2013, o el Gran Telescopio para Sondeos Sinópticos (LSST), cuya puesta en marcha está prevista para 2021, recopilarán más y mejor información sobre la estructura a gran escala del universo y la historia de su expansión. El proyecto WFIRST-AFTA, de la NASA, contará con un telescopio espacial de 2,4 metros cuyo lanzamiento tendrá lugar en la década de 2020 y del que se espera que observe supernovas lejanas, oscilaciones acústicas bariónicas y lentes gravitatorias. Y, en 2020, la ESA lanzará la misión espacial Euclides, la cual empleará lentes gravitatorias, oscilaciones acústicas bariónicas y la distancia a las galaxias obtenidas a partir de su desplazamiento al rojo para determinar la distribución tridimensional de los cúmulos de galaxias.

Por último, las teorías de gravedad modificada podrán ponerse a prueba mediante experimentos relativos al sistema solar. Uno de ellos se basa en medir la distancia entre la Tierra y la Luna con una precisión asombrosa (haciendo incidir luz láser sobre reflectores colocados en la Luna por los astronautas del programa Apolo), gracias a lo cual podrían detectarse minúsculas discrepancias con respecto a las predicciones de la relatividad general. Además, varios experimentos de laboratorio también buscarán posibles desviaciones de las leyes de la gravedad.

Los próximos años serán clave en las investigaciones sobre la energía oscura. Albergamos la esperanza de lograr progresos notables en nuestro intento por abordar las preguntas abiertas en torno a la expansión acelerada del universo. Las respuestas nos revelarán nada más y nada menos que el futuro del cosmos. IyC

PARA SABER MÁS

Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. Adam G. Riess et al. en *The Astronomical Journal*, vol. 116, n.º 3, págs. 1009-1038, septiembre de 1998.

Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae. Saul Perlmutter et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 517, n.º 2, págs. 565-586, junio de 1999.

The accelerating universe. Mario Livio. Wiley, 2000.

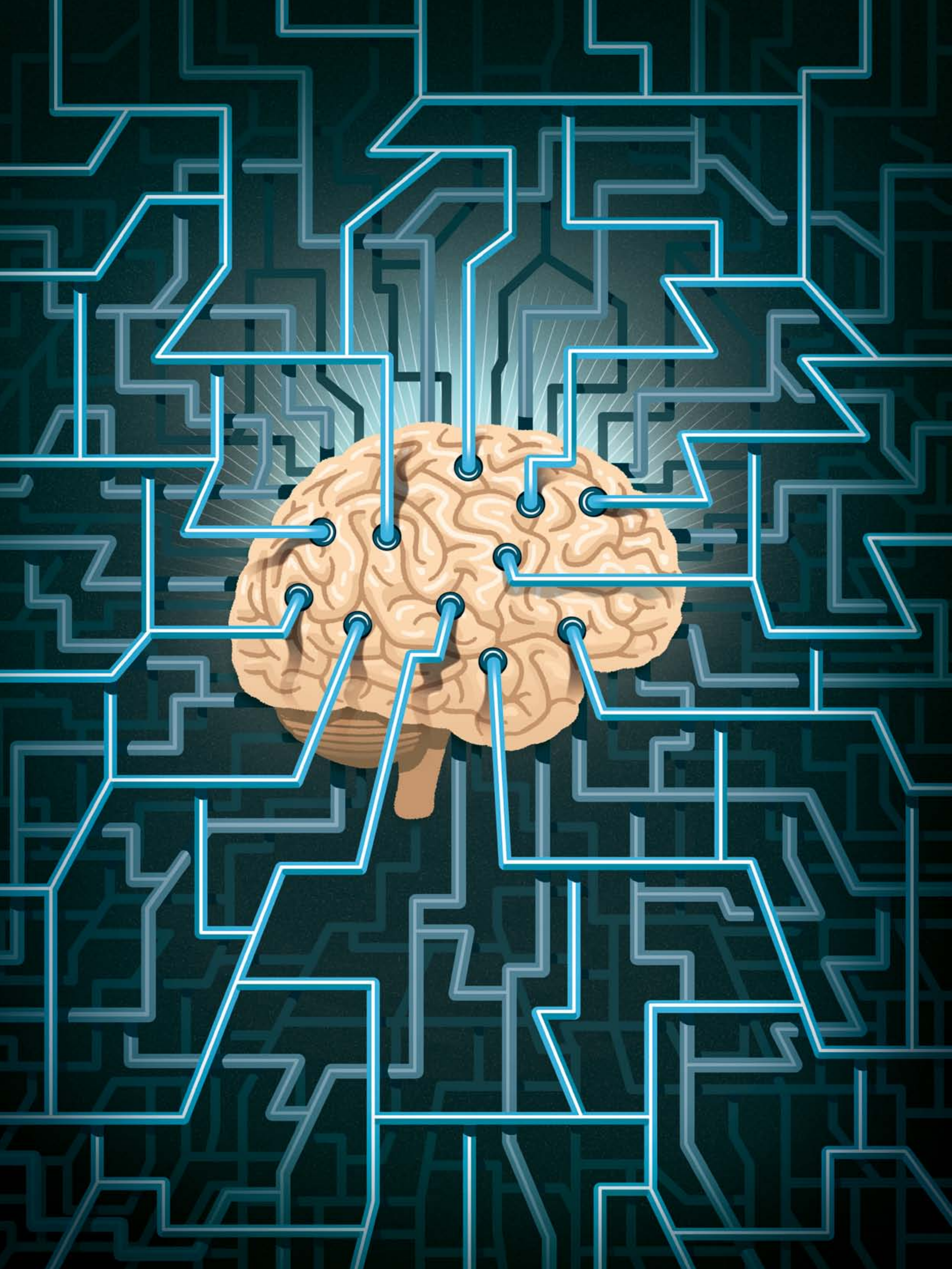
EN NUESTRO ARCHIVO

El universo y su quintaesencia. Jeremiah P. Ostriker y Paul J. Steinhardt en *IyC*, marzo de 2001.

Cuando la aceleración cambió de signo. Adam G. Riess y Michael S. Turner en *IyC*, abril de 2004.

La constante cosmológica. Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner en *IyC*, noviembre de 2004.

El Sondeo de la Energía Oscura. Joshua Frieman en *IyC*, enero de 2016.



NEUROCIENCIA

DRENAJE CEREBRAL

Mientras dormimos, un complejo sistema interno de conductos retira los desechos tóxicos del cerebro

Maiken Nedergaard y Steven A. Goldman

El cerebro humano solo pesa unos 1400 gramos, un 2 por ciento de la masa corporal media de un adulto. No obstante, sus células consumen entre el 20 y el 25 por ciento de la energía del cuerpo. En este proceso se generan ingentes cantidades de residuos proteicos y biológicos potencialmente tóxicos. Todos los días, el cerebro adulto elimina unos 7 gramos de proteínas usadas que deben ser reemplazadas por otras recién sintetizadas. Dicha cifra supone el reemplazo de unos de 230 gramos de residuos al mes: unos 2800 gramos, el equivalente a dos veces el peso del cerebro, a lo largo de un año.

Para sobrevivir, el cerebro debe disponer de alguna forma de librarse de los desechos. Resultaría inconcebible que un órgano ajustado con tanta precisión como para producir pensamientos y acciones careciera de un sistema eficiente de eliminación de residuos. Pero, hasta hace poco, el sistema de tuberías del cerebro seguía siendo un misterio en varios aspectos. Se ignoraba hasta qué punto las células del cerebro procesaban sus propios residuos, o si, por el contrario, estos eran transportados fuera del sistema nervioso para su eliminación. ¿Y por qué parecía que la evolución no había capacitado al cerebro para enviar los productos de desecho a otros órganos más aptos para procesarlos? El hígado, al fin y al cabo, es una potente planta de tratamiento encargada de eliminar o reciclar residuos.

Hace unos cinco años nos propusimos aclarar cómo se libra el cerebro de las proteínas y otros desechos. También empezamos a explorar si las interferencias con dicho proceso no causarían los problemas cognitivos que se padecen en las enfermedades neurodegenerativas. Pensábamos que las alteraciones en la retirada de residuos podían contribuir a esas dolencias: era de esperar que condujesen a la acumulación de restos proteicos en el interior de las células y alrededor de estas.

PETER HOEY

Maiken Nedergaard trabaja en el Centro Médico de la Universidad de Rochester y en la Universidad de Copenhague. Investiga las células cerebrales que constituyen la glía; en particular los astrocitos, un tipo de célula glial relacionado con varios trastornos neurológicos.

Steven A. Goldman es profesor de neurociencia y neurología en la facultad de medicina y odontología de la Universidad de Rochester y en la Universidad de Copenhague.



Tal idea nos intrigaba, dado que ya se sabía que dichos agregados proteicos se forman realmente en las células del cerebro y que, en la mayoría de los casos, están relacionados con enfermedades neurodegenerativas. Es más, se sabía que esos agregados podían impedir la transmisión de señales eléctricas y químicas en el cerebro y provocar un daño irreparable. De hecho, la patología del alzhéimer, del párkinson y de otras enfermedades neurodegenerativas asociadas al envejecimiento puede reproducirse en modelos animales si se fuerza la sobreproducción de esos agregados proteicos.

En nuestra investigación detectamos un sistema, que todavía no había sido descubierto, que se encargaba de la retirada de proteínas y otros residuos del cerebro, y comprobamos que alcanzaba su actividad máxima durante el sueño. La necesidad de eliminar desechos potencialmente tóxicos del cerebro podría incluso contribuir a resolver el misterio de por qué dormimos durante un tercio de nuestras vidas [*véase* «Las funciones vitales del sueño», por Robert Stickgold; Investigación y Ciencia, diciembre de 2015]. Estamos convencidos de que saber qué sucede cuando este sistema funciona mal nos conducirá tanto a nuevas técnicas de diagnóstico como a nuevos tratamientos para diversas enfermedades neurológicas.

EL SISTEMA GLINFÁTICO

En la mayor parte de las zonas del cuerpo, los residuos proteicos generados por los tejidos son retirados por el sistema linfático, una intrincada red de vasos que transportan fluido. El líquido que transporta los residuos se mueve entre las células por medio de esa red; se acumula en pequeños conductos que desembocan en otros mayores, que se unen finalmente a los vasos sanguíneos. Esta estructura de conductos también proporciona una vía para la defensa inmunitaria, ya que es en ellos, en puntos clave de la red, donde se encuentran los ganglios linfáticos (un reservorio de los glóbulos blancos que se encargan de luchar contra las infecciones). Sin embargo, durante un siglo los neurocientíficos creyeron que ni el cerebro ni la médula espinal disponían de sistema linfático; se daba por sentado que el cerebro eliminaba los residuos por sí mismo. Nuestra investigación enseña que esta no es toda la historia.

Los vasos sanguíneos del cerebro están rodeados por los denominados espacios perivasculares, unos túneles de sección anular que rodean a cada vaso sanguíneo. La pared interna de los espacios está compuesta por la superficie de células vasculares, en su mayoría células endoteliales y células musculares lisas. Pero la pared externa es específica del cerebro y de la médula espinal, y está formada por las extensiones ramificadas de un tipo de células especializadas, los astrocitos.

Los astrocitos son células de apoyo que llevan a cabo una gran cantidad de funciones para la red interconectada de neuronas que transmite señales por todo el cerebro. Las extensiones de los astrocitos —sus «pies vasculares»— envuelven por completo las arterias, los capilares y las venas del cerebro y de la médula espinal. La cavidad tubular vacía que se forma entre los pies de los astrocitos y los vasos sanguíneos permanece en gran medida libre de obstrucciones; se crea así una especie de desagüe que permite un transporte rápido de fluido a través del cerebro.

Se conocía la existencia del espacio perivascular, pero solo en tiempos muy recientes se le ha encontrado una función específica. Hace treinta años, Patricia Grady, en aquellos momentos de la Universidad de Maryland, describió los flujos de fluido perivascular, pero la importancia de este hallazgo no se reconocería hasta mucho tiempo después. Expuso que, cuando se inyectaban proteínas de gran tamaño en el líquido cefalorraquídeo (LCR), se las detectaba posteriormente en los espacios perivasculares tanto de perros como de gatos. Otros grupos no pudieron replicar sus hallazgos en aquel momento, y al no comprenderse lo que podía significar dicha observación, no se llevaron a cabo más trabajos al respecto.

Cuando empezamos nuestras investigaciones sobre el sistema de eliminación de residuos del cerebro, hace tan solo algunos años, nos centramos en descubrimientos anteriores que determinaron que, en los pies vasculares de los astrocitos, es-

EN SÍNTESIS

Cada día el cerebro elimina unos 7 gramos de proteínas usadas que deben ser reemplazadas por otras recién sintetizadas. Mediante dicho proceso se eliminan unos 230 gramos de residuos al mes y unos 2800 al año, una cantidad equivalente a dos veces el peso del cerebro.

¿A dónde van a parar esos residuos, si el cerebro carece de una red de vasos linfáticos que transporten los desechos hacia el exterior del sistema nervioso? Nuevas investigaciones han demostrado la existencia de canales transportadores de residuos en el interior del cerebro, los cuales muestran una actividad máxima durante el sueño.

El sistema glinfático, el nombre con que se conoce a dichos vasos de fluidos, puede resultar una diana crucial para el tratamiento de enfermedades neurológicas como el alzhéimer o el párkinson, que aparecen como resultado de la acumulación de proteínas tóxicas que no han sido retiradas del cerebro.

Limpieza de cerebro

Un intrincado sistema de vasos, el sistema glinfático, serpentea por todo el cerebro y transporta el fluido que lo libera de las proteínas descartadas y de otros residuos que pueden agregarse y convertirse en tóxicos si no se retiran. Los fragmentos proteicos conocidos como péptidos amiloide beta, presentes en la enfermedad de Alzheimer, son un ejemplo de residuo celular retirado mediante este sistema de drenaje, el cual opera principalmente durante el sueño.

Fluido entrante

El líquido cefalorraquídeo (LCR) procedente del espacio subaracnoideo, situado entre el cráneo y el cerebro, se desplaza a través de una cavidad (el espacio periarterial) que rodea a una arteria propulsado por el flujo sanguíneo. El LCR penetra en los minúsculos canales que se extienden desde la cavidad hasta unas células denominadas astrocitos, cuyos pies vasculares forman el espacio periarterial que rodea a los vasos sanguíneos. El LCR se mueve después hacia el exterior de los astrocitos y viaja por flujo convectivo a través del tejido cerebral.

Residuos eliminados

El fluido, después de haber acumulado los residuos del tejido cerebral, es transportado al espacio perivenoso, que envuelve la red de venas que drena la sangre del cerebro. En esa cavidad el fluido circula alrededor de venas cada vez mayores, que acaban alcanzando el cuello (*véase el detalle del cerebro arriba*). Los residuos se desplazan finalmente hacia el sistema linfático, desde donde alcanzan el torrente sanguíneo.

Cráneo
Espacio subaracnoideo
Líquido cefalorraquídeo
Astrocito
Pie vascular del astrocito
Espacio periarterial
Arteria
Flujo convectivo
Vena
Espacio perivenoso
Canal
Residuos (*puntos negros*)

SHIZUKA N. AOKI

taban insertados canales de agua —formados por una proteína, la acuaporina-4—, y con tal densidad que era comparable a la existente en los riñones, un órgano cuya tarea es, básicamente, transportar agua.

Nos sentimos interesados de inmediato por la multiplicidad de canales de agua astrocitarios y por su colocación frente a las paredes de los vasos sanguíneos. Nuestro interés creció aún más cuando analizamos la cuestión con mayor profundidad, ya que descubrimos que las células endoteliales vasculares que bordean el espacio perivascular carecían de dichos canales. Así pues, el fluido no podía estar moviéndose directamente desde la circulación sanguínea hacia el tejido cerebral, sino que tenía que estar fluyendo por el espacio perivascular y hacia el interior de los astrocitos, lo que le permitiría acceder al tejido cerebral.

Nos preguntamos si el espacio perivascular no constituiría un sistema linfático neuronal. ¿Tal vez podía tratarse de un conducto para el líquido cefalorraquídeo? El pulso arterial conduciría el LCR a través del espacio perivascular. Desde allí, parte del líquido entraría en los astrocitos a través de sus pies perivasculares. Podría entonces desplazarse a la zona entre las células y, finalmente, para que se retirasen los productos de desecho del cerebro, al espacio perivascular que rodea las venas.

Junto con Jeff Iliff y Rashid Deane, miembros de nuestro laboratorio, nos dispusimos a confirmar esta hipótesis. Con

tinciones químicas que coloreaban el fluido, en combinación con técnicas microscópicas que obtenían imágenes de las zonas profundas de tejido cerebral vivo, pudimos observar directamente que el bombeo de sangre propulsaba grandes cantidades de LCR hacia el interior del espacio perivascular que rodea a las arterias. Utilizando los astrocitos a modo de conducto, el LCR se movía entonces a través del tejido cerebral, donde salía de los astrocitos y arrastraba proteínas descartadas.

Los fluidos salían del cerebro por el espacio perivascular que rodeaba a las pequeñas venas que drenan este órgano, venas que se unían después a otras mayores que proseguían hasta el cuello. Los líquidos con los materiales de desecho seguían circulando hasta penetrar en el sistema linfático, desde el cual volvían a la circulación sanguínea general. Allí se combinaban con residuos proteicos de otros órganos, y su destino final era que los filtrasen los riñones o los procesase el hígado.

En el cerebro sano, el sistema glinfático retira las proteínas asociadas con el alzhéimer, el párkinson y otras enfermedades neurológicas

Al empezar nuestra investigación, desconocíamos por completo que los astrocitos desempeñaban un papel tan crucial en ese sistema cerebral homólogo al linfático. Obtuvimos pruebas adicionales cuando utilizamos ratones modificados genéticamente a los que les faltaba la proteína acuaporina-4, que forma los canales de agua de los astrocitos. La velocidad del flujo de LCR que entraba en los astrocitos se redujo en un 60 por ciento, lo que enlenteció considerablemente el transporte de fluido a través del cerebro.

Habíamos trazado así una ruta completa en el interior del cerebro por donde estos fluidos limpiadores podían llevarse los productos de desecho de forma eficaz. Denominamos a nuestro descubrimiento «sistema glinfático». La nueva palabra combinaba «glía» (un tipo de célula cerebral de la que los astrocitos son un ejemplo) y «linfático», haciendo así referencia a esta función recién descubierta de las células gliales del cerebro.

Cuando nos dimos cuenta del importante papel del sistema glinfático, de inmediato nos preguntamos si no sería posible que, como proceso ordinario, retirase del cerebro sano, además de otros residuos celulares más corrientes, las mismas proteínas que se acumulan en un cerebro afectado por una enfermedad neurodegenerativa. En especial, nos centramos en una proteína relacionada con la enfermedad de Alzheimer, el amiloide beta, de la que inicialmente se pensaba que, en circunstancias normales, se eliminaba mediante procesos de degradación o de reciclaje que tienen lugar en el interior de todas las células del cerebro. En la enfermedad de Alzheimer, los agregados de amiloide beta forman placas amiloideas entre las células, con lo que podrían contribuir al proceso patológico. Descubrimos que el sistema glinfático retira de un cerebro sano el amiloide beta, y puede que lo mismo ocurra con otras proteínas implicadas en enfermedades neurodegenerativas, como las sinucleínas que aparecen en la enfermedad de Parkinson, la enfermedad con cuerpos de Lewy y la atrofia multisistémica. Cuando el sistema glinfático no funciona de forma correcta, podrían acumularse anormalmente.

Un síntoma que acompaña a la enfermedad de Alzheimer y a otras enfermedades neurodegenerativas aportó una pista que nos sugirió cómo seguir. Numerosos pacientes con alzhéimer sufren alteraciones del sueño mucho antes de que se manifieste la demencia. En las personas mayores el sueño se vuelve más fragmentado y superficial, y dura menos tiempo. Existen estudios epidemiológicos que han mostrado que los pacientes que afirmaron padecer problemas de sueño en la mediana edad presentaron un riesgo mayor de deterioro cognitivo que sujetos control, según pruebas realizadas 25 años más tarde.

Incluso las personas sanas a las que se obliga a permanecer despiertas muestran síntomas típicos de un trastorno neurológico y de una enfermedad mental: baja concentración, lagunas de memoria, fatiga, irritabilidad y altibajos emocionales. La privación del sueño profundo produce confusión y alucinaciones, e incluso ataques epilépticos y la muerte. Los animales de laboratorio pueden morir si sufren privación de sueño durante unos cuantos días, y los seres humanos no son más resilientes. En nuestra especie, el insomnio familiar mortal es un trastorno hereditario que causa que los pacientes duerman cada vez menos hasta que mueren, por lo general durante los 18 meses posteriores al diagnóstico.

Sabiendo todo esto, nos planteamos que tal vez las dificultades del sueño asociadas a la demencia no fuesen un efecto secundario del trastorno, sino un factor que contribuía al proceso de la enfermedad. Además, si el sistema glinfático retiraba el amiloide beta a una velocidad mayor durante el sueño que cuando se está despierto, podría ocurrir que los patrones de sueño alterados de los pacientes con enfermedades neurodegenerativas contribuyesen a un empeoramiento de la dolencia. Dado que nuestros experimentos iniciales se habían llevado a cabo en ratones anestesiados, conjeturamos además que los rápidos flujos de fluido que detectamos no serían necesariamente los que deberíamos esperar en un cerebro despierto y activo, sujeto a otras demandas en su funcionamiento habitual.

Para comprobarlo, Lulu Xie y Hongyi Kang, ambos del Laboratorio de Nedergaard, entrenaron a ratones para que se quedaran quietos bajo un microscopio, de modo que se pudieran captar imágenes de un marcador químico en el LCR mediante una nueva técnica de imagen, la microscopía bifotónica. Comparamos el movimiento del trazador a través del sistema glinfático de ratones despiertos y dormidos. Dado que los estudios de imagen no son ni invasivos ni dolorosos, los ratones permanecían quietos y obedientes, hasta el punto de que muchos se dormían. De este modo pudimos obtener imágenes de la entrada de LCR en una zona particular del cerebro del mismo ratón tanto mientras dormía como mientras estaba despierto.

Resultó que la presencia de LCR en el sistema glinfático se reducía drásticamente mientras los ratones del estudio permanecían despiertos. Al cabo de pocos minutos de iniciarse el sueño o de manifestarse los efectos de la anestesia, en cambio, las entradas de fluido aumentaban de forma significativa. En colaboración con Charles Nicholson, de la Universidad de Nueva

York, descubrimos que el espacio intersticial cerebral (el área entre las células a través de la cual se desplaza el fluido linfático de camino hacia los espacios perivasculares que rodean a las venas) aumentaba en más del 60 por ciento cuando los ratones se dormían. Actualmente creemos que el flujo de fluido glinfático aumenta durante el sueño porque el espacio entre las células se expande, lo que contribuye a empujar el líquido a través del tejido cerebral.

Nuestra investigación también mostró cómo se controla la velocidad del fluido. La noradrenalina (un neurotransmisor, o molécula señalizadora) parece ser la encargada de regular el volumen del área intersticial y, en consecuencia, la velocidad del flujo glinfático. Los niveles de noradrenalina aumentaban cuando los ratones estaban despiertos y eran escasos durante el sueño, lo que implicaba que la reducción transitoria en la disponibilidad de noradrenalina durante el sueño conllevaba un aumento del flujo glinfático.

EL PODER DEL SUEÑO

Tras demostrar que la expansión y la contracción del espacio intersticial durante el sueño eran importantes tanto para la función cerebral como para la eliminación de residuos proteicos, quisimos poner a prueba un corolario: ¿era posible que la privación de sueño acelerara las enfermedades neurodegenerativas? Los experimentos que llevamos a cabo en ratones mostraron que, durante el sueño, el sistema glinfático retiraba el amiloide beta del cerebro con una eficiencia considerable; a más del doble de velocidad que en el estado de vigilia. Por otro lado, los ratones modificados genéticamente para que no dispusieran de canales de agua de acuaporina-4 en los astrocitos mostraron una función glinfática alterada y retiraron un 40 por ciento menos de amiloide beta que los animales control.

El porcentaje, bastante alto, de amiloide beta retirado puso en duda la idea, muy aceptada, de que las células del cerebro destruyen todos sus residuos internamente (a través de procesos de degradación denominados ubiquitinación y autofagia). Ahora sabemos que el cerebro se deshace de una gran cantidad de proteínas no deseadas cuando todavía están enteras, expulsándolas hacia el exterior para que sean degradadas con posterioridad. Estos nuevos hallazgos, además, parecían confirmar que el cerebro dormido exporta residuos proteicos, incluyendo el amiloide beta, a través del sistema de transporte glinfático. Esta tesis recibió un apoyo adicional del grupo de David M. Holtzman, de la Universidad de Washington en St. Louis, el cual demostró que la concentración de amiloide beta en el espacio intersticial es más elevada durante la vigilia que durante el sueño, y que la privación de sueño agrava la formación de placas amiloideas en ratones modificados genéticamente para acumularlas en exceso.

Por el momento, estas investigaciones no han ido más allá de los laboratorios de investigación básica. Las empresas farmacéuticas aún no se plantean terapias contra la demencia que retiren físicamente el amiloide y otras proteínas tóxicas lavando el cerebro con fluidos linfáticos. Pero quizá deberían. Se necesitan desesperadamente nuevas estrategias para una enfermedad que supone para el sistema sanitario de Estados Unidos un coste de 226.000 millones de dólares al año. Se están llevando a cabo una gran cantidad de ensayos clínicos para la enfermedad de Alzheimer, aunque ninguno de los fármacos en desarrollo ha demostrado todavía un beneficio claro. La estimulación del flujo glinfático ofrece un enfoque nuevo que merece la pena investigar.

Un fármaco que regulase el sistema glinfático mediante el aumento de la velocidad del flujo de LCR durante el sueño podría, literalmente, arrastrar el amiloide hasta el exterior del cerebro. Un tratamiento utilizado para un síndrome neurológico muy conocido proporciona una pista de que este método podría funcionar. La hidrocefalia normotensiva, una enfermedad que aparece de ordinario en personas mayores, es una forma de demencia en la que se acumula un exceso de LCR en las cavidades centrales huecas del cerebro, los ventrículos cerebrales. Cuando se realiza una punción lumbar y se extrae el líquido mediante drenaje, los pacientes suelen mostrar mejoras sustanciales en sus facultades cognitivas. La razón de que suceda así ha sido un misterio durante largo tiempo. Nuestra investigación sugiere que la restauración del flujo en el sistema glinfático interviene en la mejora cognitiva de esos pacientes.

Aunque no sea inminente ningún nuevo fármaco de esa índole, el conocimiento del sistema glinfático aporta nuevas ideas para el diagnóstico de la enfermedad de Alzheimer y de otros trastornos neurológicos. Un estudio reciente de Helene Benveniste, de la facultad de medicina de Stony Brook, ha demostrado que la resonancia magnética nuclear estándar permite visualizar y cuantificar la actividad del sistema glinfático. Gracias a esta técnica, quizá pueda haber tests de flujo glinfático diseñados para predecir la evolución de la enfermedad en pacientes con alzhéimer o demencias relacionadas, o bien en personas afectadas por la hidrocefalia normotensiva. Podrían incluso predecir la capacidad de recuperación de personas afectadas por un traumatismo craneoencefálico. La mayoría de nuestros estudios del sistema glinfático se han centrado hasta la fecha en la eliminación de los residuos de proteínas, pero el sistema glinfático puede resultar un campo fructífero para lograr un conocimiento básico del funcionamiento del cerebro.

Por último, puede que los líquidos que circulan a través del sistema glinfático hagan algo más que retirar residuos: tal vez transporten distintos nutrientes y otras sustancias al tejido cerebral. Un nuevo estudio ha demostrado que los canales glinfáticos aportan glucosa a las neuronas para proveerlas de energía. Se están realizando otros estudios para determinar si la materia blanca, la cubierta que hace las veces de aislante alrededor de los axones (las extensiones de las neuronas, similares a cables), depende del sistema glinfático para el transporte tanto de nutrientes como de materiales necesarios para el mantenimiento de la integridad estructural de la célula. Estas investigaciones prometen elucidar los muchos roles inesperados del sistema glinfático en la vida diaria —y nocturna— del cerebro.

PARA SABER MÁS

Distinct functional states of astrocytes during sleep and wakefulness: Is norepinephrine the master regulator? John O'Donnell et al. en *Current Sleep Medicine Reports*, vol. 1, n.º 1, págs. 1-8, marzo de 2015.

Regulation of cerebrospinal fluid (CSF) flow in neurodegenerative, neurovascular and neuroinflammatory disease. Matthew J. Simon y Jeffrey J. Iliff en *Biochemica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Basis of Disease*. Publicado en línea el 22 de octubre de 2015.

The glymphatic system: A beginner's guide. Nadia Aalling Jessen et al. en *Neurochemical Research*, vol. 40, n.º 12, págs. 2583-2599, diciembre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Células de la glía. R. Douglas Fields en *IyC*, junio de 2004.

ASTROPARTÍCULAS

LA RED DE TELESCOPIOS CHERENKOV

Un ambicioso proyecto mundial permitirá estudiar con un nivel de detalle sin precedentes las fuentes cósmicas de partículas más energéticas del universo

Juan Cortina y Manel Martínez



ECOS DEL UNIVERSO VIOLENTO: Al llegar a la atmósfera terrestre, los rayos gamma de origen cósmico desencadenan una emisión de luz azulada conocida como radiación de Cherenkov. Su análisis permite reconstruir las propiedades de los rayos gamma originales y estudiar las fuentes cósmicas que los producen, en las que intervienen algunos de los fenómenos más energéticos del universo. Tales procesos serán el objeto de estudio de la Red de Telescopios Cherenkov (*recreación artística*).



Juan Cortina investiga en astronomía de rayos gamma en el Instituto de Física de Altas Energías (IFAE) de Barcelona. Ha sido portavoz del experimento MAGIC y actualmente es investigador principal del grupo de trabajo CTA-LST, encargado de desarrollar los mayores instrumentos de la Red de Telescopios Cherenkov (CTA).

Manel Martínez es investigador catedrático del IFAE, donde coordina el grupo de astronomía de rayos gamma. En el pasado ha sido portavoz de MAGIC y luego coportavoz de CTA. Actualmente coordina la participación española en CTA y el comité de dirección del proyecto CTA-LST.



Entre los espectáculos más hermosos

que puede ofrecernos el cielo nocturno se encuentran, sin duda, las lluvias de estrellas. Al contrario que el firmamento ordinario, el cual se nos aparece a simple vista como eterno e inmutable, las lluvias de estrellas nos recuerdan que el universo es cambiante. Acaparan nuestra atención por la rapidez con que se desarrollan y por la sorpresa que nos causan esos fragmentos de material extraterrestre cuando los vemos morir ante nosotros en un derroche de energía.

Si nuestros ojos fuesen mucho más sensibles y veloces, el cielo nocturno se nos presentaría en todo momento como una intensa lluvia de estrellas. La Tierra sufre de manera constante el bombardeo de los rayos cósmicos, partículas de muy alta energía que, al impactar contra la atmósfera, emiten un tenue y ultrarrápido destello de luz azulada. Esta radiación se genera porque, al chocar contra las moléculas del aire, los rayos cósmicos desencadenan una cascada de partículas secundarias tan energéticas que su velocidad supera a la de la luz en este medio. Como consecuencia, se produce una onda de choque electromagnética, análoga al estallido acústico que tiene lugar cuando un avión rompe la barrera del sonido. Esa onda de choque recibe el nombre de luz de Cherenkov, y su análisis permite obtener valiosa información sobre la naturaleza de los rayos cósmicos.

El estudio de los rayos cósmicos, hoy centenario, ha contribuido de manera fundamental a nuestra comprensión del universo. Este campo fue, de hecho, el precursor de la física de partículas moderna, una disciplina que en los últimos decenios ha logrado un desarrollo impresionante gracias a la construcción de gigantescos aceleradores de partículas, como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. Sin embargo, las energías que pueden obtenerse en los aceleradores fabricados por el ser humano palidecen en comparación con las que alcanzan los aceleradores de origen cósmico, ya que entre ellos se encuentran algunos de los mayores cataclismos del universo.

Ese universo violento y extremo no se parece en nada al firmamento de aspecto inmutable al que nos tiene acostumbrados la astronomía tradicional. Se trata de un universo rápido, dinámico y lleno de sorpresas, en el que mundos enteros mueren en explosiones estelares casi inconcebibles, son engullidos en pantagrúelicos festines por parte de gigantescos agujeros negros o se convierten en enormes dinamos en rápida rotación que emiten ingentes cantidades energía. Ese es el universo que explora la moderna astronomía de altas energías, o de astropartículas, y a él podemos acceder gracias al estudio de la radiación de Cherenkov.

Sin embargo, hasta hace relativamente poco los telescopios no podían captar la luz de Cherenkov producida por los rayos cósmicos. Ello se debe a que, para ganar contraste en la imagen,

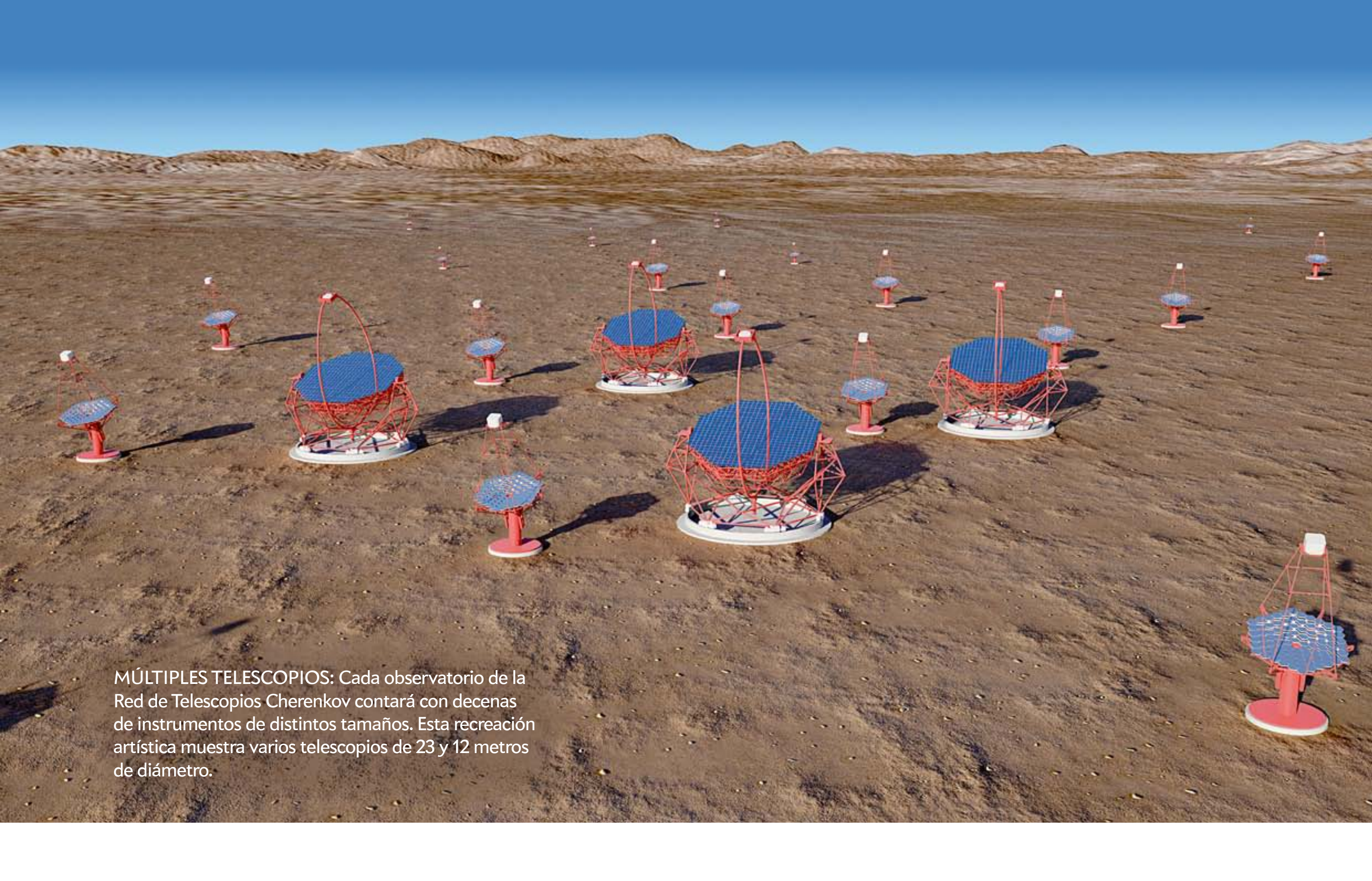
DESY/MILDE SCIENCE COMMUNICATION (*páginas anteriores*)

EN SÍNTESIS

Los rayos gamma (radiación electromagnética de muy alta energía) se producen en algunos de los fenómenos más violentos del universo, como las explosiones de supernova o los procesos de acreción que tienen lugar en los agujeros negros.

En los próximos años, un consorcio internacional pondrá en marcha la Red de Telescopios Cherenkov, el mayor observatorio terrestre de rayos gamma jamás construido. Se espera que el proyecto revolucione la astronomía de rayos gamma.

Con una sede en cada hemisferio y un total de más de 100 telescopios, el proyecto permitirá abordar varias preguntas aún abiertas en astrofísica y física fundamental. Las instalaciones se construirán en Chile y en la isla canaria de La Palma.



MÚLTIPLES TELESCOPIOS: Cada observatorio de la Red de Telescopios Cherenkov contará con decenas de instrumentos de distintos tamaños. Esta recreación artística muestra varios telescopios de 23 y 12 metros de diámetro.

G. PÉREZ/INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS/SMM

los telescopios tradicionales integran la luz durante largos períodos de tiempo, lo que impide distinguir los destellos de radiación de Cherenkov en medio del fondo difuso de luz nocturna. Y si bien los primeros instrumentos capaces de lograrlo se construyeron hace aproximadamente medio siglo, esta nueva forma de explorar el universo solo comenzó a ofrecer resultados tangibles hace unos 25 años. La astronomía basada en telescopios Cherenkov es, por tanto, una técnica muy joven cuya madurez se espera que llegue en las próximas décadas. En gran parte, ello será posible gracias a un ambicioso proyecto internacional: la Red de Telescopios Cherenkov, más conocida por sus siglas en inglés, CTA (Cherenkov Telescope Array).

Concebido hace casi diez años, este gran programa de investigación cuenta hoy con 1500 científicos e ingenieros de más de 30 países de los cinco continentes. Una vez en marcha, el proyecto dispondrá de dos grandes observatorios, uno en cada hemisferio, desde los que numerosos telescopios Cherenkov de distintos tamaños podrán rastrear todo el cielo. El año pasado, tras un largo y complejo proceso para decidir su ubicación, el consorcio CTA decidió comenzar las negociaciones para levantar los observatorios en el desierto chileno de Atacama y en la isla canaria de La Palma. El acuerdo final deberá firmarse este año, cuando también comenzará la construcción de los telescopios. Con un coste estimado de unos 300 millones de euros (100 millones el observatorio norte y 200 el sur), se espera que las instalaciones estén completadas dentro de unos cinco años. Desde ese momento, quedarán abiertas a toda la comunidad científica internacional y permanecerán operativas durante unos treinta años.

EL UNIVERSO EN RAYOS GAMMA

A la Tierra llegan de manera constante distintos tipos de partículas; principalmente, protones de alta energía. De ellas, los telescopios Cherenkov pueden seleccionar los rayos gamma, la radiación electromagnética más energética que existe. En su camino hacia nuestro planeta, los rayos gamma no sufren la desviación de los campos magnéticos (ya se trate del terrestre, del galáctico o del extragaláctico), lo que permite identificar su origen, sus fuentes y su propagación. En otras palabras, podemos hacer astronomía de rayos gamma tal y como desde hace décadas viene haciéndose con las demás bandas del espectro electromagnético, como la infrarroja, la ultravioleta o las ondas de radio, entre otras.

Hoy conocemos unas 150 fuentes cósmicas de rayos gamma de muy alta energía; es decir, con energías superiores a los 10 gigaelectronvoltios (GeV). Buena parte ellas son aceleradores cósmicos situados en nuestra propia galaxia, como remanentes de supernova, sistemas binarios en los que al menos uno de los miembros es un objeto compacto (un agujero negro, una estrella de neutrones o una enana blanca), o púlsares (estrellas de neutrones recubiertas por una corteza de hierro que rotan a gran velocidad y generan un intenso campo magnético). Por su parte, las fuentes extragalácticas conocidas son fundamentalmente núcleos galácticos activos: galaxias enteras en las que un agujero negro de miles de millones de masas solares está engullendo lo que hay a su alrededor. Todos estos sistemas revisten el máximo interés en astrofísica, ya que constituyen entornos cósmicos en los que las leyes que solemos emplear para describir los fenómenos ordinarios se hallan en su límite de aplicabilidad.

Pero, además de ser nuestra mejor ventana para estudiar los grandes aceleradores cósmicos, la astronomía de rayos gamma permite también abordar varias cuestiones clave en física fundamental. Entre ellas se encuentra la naturaleza de la materia oscura (numerosos modelos predicen que las partículas que la componen deberían provocar ocasionalmente la emisión de rayos gamma), la densidad y distribución de los campos magnéticos cósmicos [*véase* «Campos magnéticos cósmicos: reliquias de la gran explosión», por Francesc Ferrer; Investigación y Ciencia, diciembre de 2015] o incluso la posible estructura cuántica del espaciotiempo predicha por algunos de los marcos teóricos que intentan conjugar la relatividad general de Einstein y la mecánica cuántica.

Los avances de los últimos años han convertido la astronomía de rayos gamma de alta energía en la rama más exitosa y prometedora de la investigación en astropartículas, y han hecho de ella una disciplina con un enorme potencial para entender mejor el universo. Ese potencial podrá desarrollarse al máximo gracias al proyecto CTA. Sus instrumentos detectarán rayos gamma con energías comprendidas entre pocas decenas y cientos de miles de GeV, lo que supondrá aumentar en un orden de magnitud la ventana de observación de los telescopios Cherenkov actuales. También su sensibilidad superará en un factor diez a la de los proyectos hoy en marcha. Ello no solo permitirá analizar con un detalle sin precedentes los sistemas cósmicos mencionados, sino que probablemente nos brindará la oportunidad de descubrir fenómenos completamente nuevos. La historia de la física moderna nos ha enseñado que, cada vez que la humanidad ha aumentado en un orden de magnitud la sensibilidad de sus aparatos de medida o la energía de los fenómenos estudiados, la naturaleza nos ha sorprendido con hallazgos que antes ni siquiera hubiéramos sido capaces de imaginar.

HISTORIA DE UNA TÉCNICA

La idea de aprovechar la luz de Cherenkov atmosférica para explorar el universo a altas energías no es nueva. La primera detección de la radiación de Cherenkov generada por los rayos cósmicos fue llevada a cabo en 1953 por W. Galbraith y J. V. Jelley, del antiguo Establecimiento para la Investigación en Energía Atómica del Reino Unido. Unos años después, varios observatorios en distintas partes del mundo construyeron los primeros telescopios basados en esa idea. Sin embargo, la detección de rayos gamma procedentes de una fuente astrofísica identificable no llegó hasta 1989, cuando el telescopio Whipple de Arizona captó la radiación procedente de la nebulosa del Cangrejo, los restos de una explosión de supernova observada hacia el año 1000 por astrónomos chinos. Aquel hito fue posible gracias al tenaz Trevor Weekes, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, quien no desistió en su empeño a pesar de que el hallazgo le supuso un trabajo continuado de más de veinte años.

Tras aquel descubrimiento, varios observatorios en ambos hemisferios construyeron una segunda generación de telescopios Cherenkov. Tras probar con diferentes técnicas, el catálogo de fuentes de rayos gamma aumentó hasta casi una decena. Pero lo más importante de aquella generación de experimentos fue que permitió establecer la tecnología más adecuada para estudiar el universo en rayos gamma. Esta se basa en los llamados telescopios Cherenkov de imágenes atmosféricas (IACT, por sus siglas en inglés), los cuales continúan usándose hoy.

En estos instrumentos, el destello de luz de Cherenkov es captado por un telescopio óptico equipado con un gran espejo primario de alta reflectividad (aunque de calidad óptica moderada) en cuyo foco se sitúa una matriz con miles de fotosensores ultrasensibles y ultrarrápidos. Estos fotosensores, también denominados fotomultiplicadores, son capaces de detectar pulsos de pocos fotones y apenas unos nanosegundos de duración. Gracias a ello pueden obtener una imagen de la manera en que se genera la luz de Cherenkov durante la cascada atmosférica iniciada por el rayo gamma cósmico. Son las características de esta imagen las que permiten distinguir entre la luz de Cherenkov desencadenada por un rayo gamma y la emitida por los sucesos de fondo, mucho más numerosos, debidos a luz nocturna y al impacto de otros rayos cósmicos.

Uno de los experimentos más importantes de esa segunda generación de telescopios fue HEGRA, un proyecto internacional instalado en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma, el cual permaneció operativo entre los años 1994 y 2000. HEGRA dejó clara la importancia de usar baterías de telescopios Cherenkov para incrementar la sensibilidad de un observatorio, así como la necesidad de aumentar el tamaño de los espejos para ampliar el umbral energético en la detección de fotones gamma.

Ya en este siglo, una tercera generación de telescopios, aún en operación, logró elevar hasta más de 150 el número de fuentes de rayos gamma cósmicos conocidas. Hoy funcionan en todo el mundo tres conjuntos de telescopios Cherenkov: el experimento H.E.S.S., en Namibia, compuesto por cuatro telescopios de 12 metros de diámetro y uno de 28 metros; VERITAS, en Arizona, formado por cuatro instrumentos de 12 metros; y MAGIC, en el Roque de los Muchachos, con dos telescopios de 17 metros. Todos ellos han demostrado el potencial científico de este nuevo campo de investigación, confirmando la variedad de fuentes de alta energía que pueblan nuestro universo y la posibilidad de estudiarlas a fondo con la tecnología IACT.

El próximo gran paso en este intento por entender el universo violento lo dará el proyecto CTA. A fin de detectar rayos gamma en un amplio intervalo de energías, sus dos observatorios contarán con extensas baterías de telescopios de distintas dimensiones. Los rayos gamma menos energéticos serán estudiados por unos pocos telescopios de gran tamaño (LST, por sus siglas en inglés), de 23 metros de diámetro; en cada observatorio, cuatro de ellos se concentrarán en un área de unos 10.000 metros cuadrados. A su alrededor, entre una y varias decenas de instrumentos de tamaño mediano (MST), con espejos de 12 metros, se distribuirán en una superficie del orden de

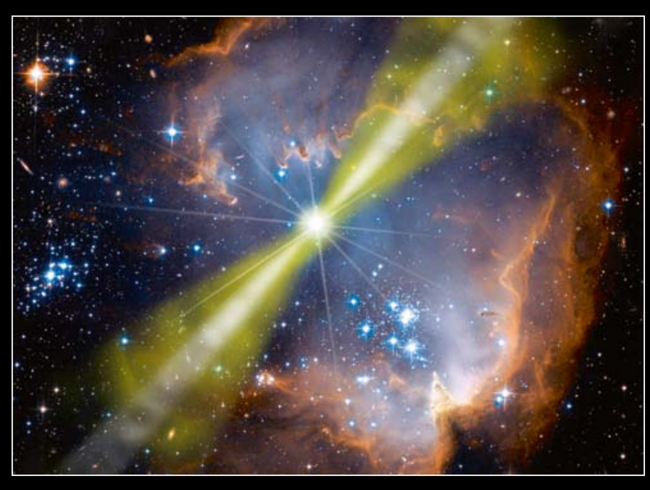
A pesar de los avances de los últimos años, la astronomía de rayos gamma es aún una disciplina joven

Un universo poco explorado

Nuestro planeta sufre constantemente el bombardeo de rayos gamma procedentes de algunos de los cataclismos más violentos del universo. En los próximos años, una colaboración de más de 1500 científicos de todo el mundo pondrá en marcha la Red de Telescopios Cherenkov (CTA, por sus siglas en inglés), el mayor observatorio terrestre de rayos gamma jamás construido. El proyecto permitirá estudiar fenómenos de física de partículas a energías imposibles de alcanzar en los aceleradores terrestres, así como abordar numerosas cuestiones abiertas en astrofísica, cosmología y física fundamental. A continuación se ilustran algunos de los fenómenos que estudiará.

Aceleradores cósmicos

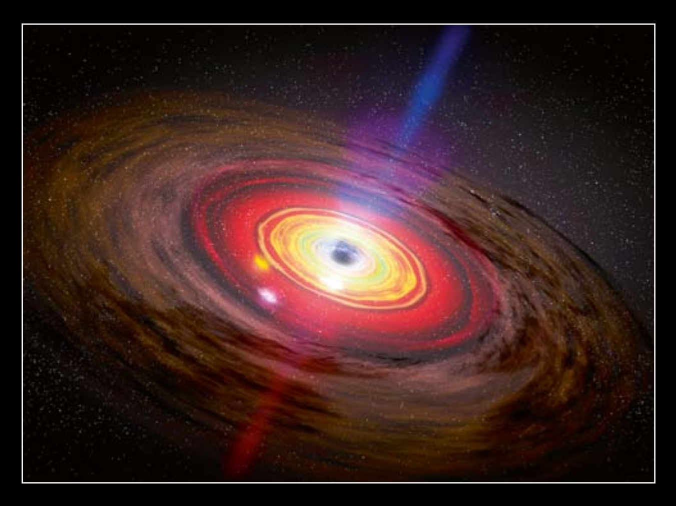
El proyecto analizará la producción de partículas de alta energía en las explosiones de supernova y en los estallidos de rayos gamma, así como en los procesos de acreción de materia en los agujeros negros galácticos y extragalácticos. En particular, CTA debería ayudar a resolver una pregunta que lleva más de un siglo abierta: ¿dónde se originan los rayos cósmicos que llegan constantemente a nuestro planeta?



Estallido de rayos gamma (*recreación artística*).

Objetos compactos

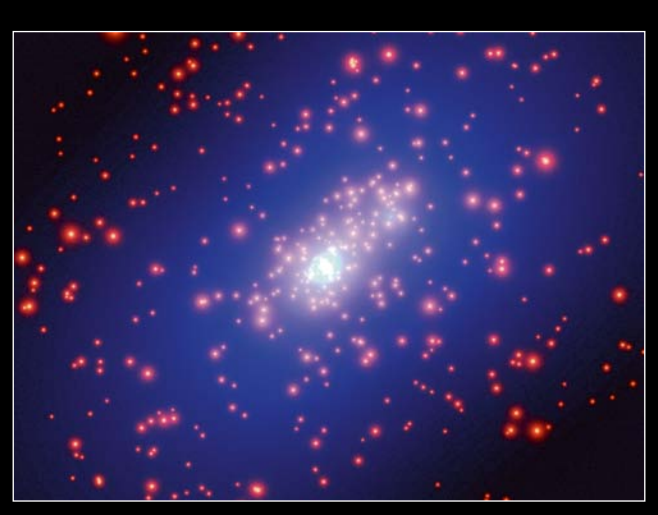
La Red de Telescopios Cherenkov podrá estudiar con gran detalle las estrellas de neutrones, los púlsares, los agujeros negros de masa estelar que pueblan la Vía Láctea y los agujeros negros supermasivos que ocupan el centro de numerosas galaxias lejanas. Sus resultados ayudarán a entender la manera en que estos sistemas interaccionan con el entorno, qué ambientes extremos crean y cuáles son sus propiedades intrínsecas.



Agujero negro supermasivo (*recreación artística*).

Materia oscura

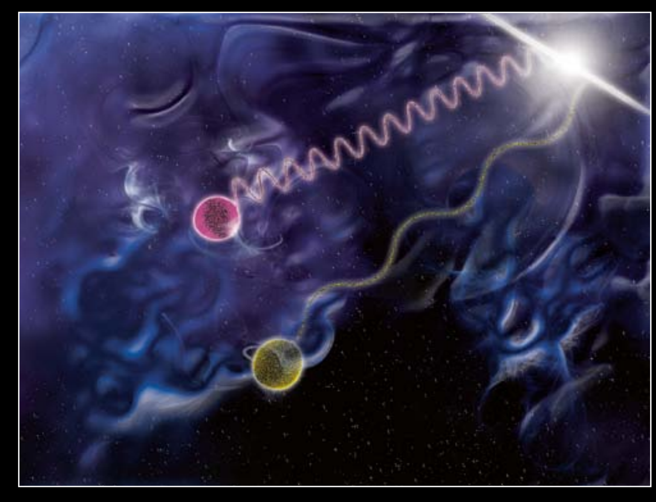
Numerosos modelos predicen que las hipotéticas partículas que componen la materia oscura deberían provocar ocasionalmente la emisión de rayos gamma, por lo que CTA resultará idóneo para estudiarla. En caso de que sus partículas sean observadas antes en el CERN o en laboratorios subterráneos, CTA debería poder confirmar el hallazgo.



Distribución inferida de materia oscura (*azul*) en el cúmulo de galaxias CL0025+1654. Cada punto de luz corresponde a una galaxia.

Espaciotiempo cuántico

CTA también podrá sondear la estructura microscópica del espaciotiempo postulada por algunos modelos de gravedad cuántica, según los cuales la velocidad de la luz debería depender ligeramente de la energía de los fotones. De ser el caso, tales cambios tendrían que plasmarse en los tiempos de llegada de los fotones de distintas energías procedentes de estallidos de rayos gamma.



Fotones de distintas energías procedentes de un estallido de rayos gamma (*recreación artística*).

NASA/SWIFT/MARY PAT HRYBYK-KEITH/JOHN JONES (*estallido de rayos gamma*); NASA/DANA BERRY/SKYWORKS DIGITAL (*agujero negro*); J.-P. KNEIB/ OBSERVATORIO MIDI-PYRENEES/CALTECH/ESA/NASA (*cúmulo de galaxias*); NASA/UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONOMA/AURORE SIMONNET (*fotones*)

un kilómetro cuadrado y captarán los rayos gamma de energías intermedias. Por último, en el observatorio sur, numerosas decenas de telescopios pequeños (SST), repartidos en un área de hasta 10 kilómetros cuadrados y con espejos de 6 metros, detectarán los rayos gamma de mayor energía. Ello se debe a que las energías cubiertas por estos instrumentos corresponden sobre todo a fuentes galácticas, las cuales se observan mejor desde el hemisferio austral. Además, varios de los instrumentos MST del observatorio sur serán telescopios de tipo Schwarzschild-Couder, los cuales poseen dos reflectores en lugar de uno.

En definitiva, el proyecto CTA exhibirá grandes ventajas sobre sus predecesores: podrá observar todo el cielo, lo hará en un intervalo de energías más amplio, con una sensibilidad un orden de magnitud mayor y con una precisión en la determinación de la posición y la energía sin precedentes.

UBICACIÓN DE LOS OBSERVATORIOS

Una de las decisiones críticas del proyecto CTA ha sido la relativa a la localización de los observatorios. En ella han intervenido aspectos tanto científicos como técnicos —por no hablar de los políticos y económicos— y de ella depende en gran medida el éxito del experimento. Además, y al contrario de lo que ocurre con la mayoría de los nuevos telescopios, la búsqueda de emplazamientos no se redujo a los observatorios astronómicos ya existentes. El motivo fue que, si bien se necesitaba un cielo oscuro, limpio y que ofreciese muchas noches despejadas al año, los telescopios de CTA no son sensibles a las turbulencias atmosféricas que tanto afectan a otros instrumentos. Como consecuencia, elegir la ubicación de los observatorios requirió un largo y complejo proceso que se prolongó durante cuatro años.

En un principio se consideraron posibles localizaciones en todo el planeta. Se buscaban sitios a altitudes intermedias y con condiciones atmosféricas (temperatura, humedad, viento, etcétera) aceptables, ya que los telescopios Cherenkov operan al aire libre, sin ninguna cúpula o cobertura que los proteja de las inclemencias meteorológicas. Sin embargo, las zonas situadas a altitudes intermedias, con cielos claros y poca contaminación suelen hallarse en desiertos o cumbres montañosas, por lo que sufren climas extremos y acostumbran a estar despobladas. Inicialmente se recibieron propuestas de Argentina, Chile y Namibia para el observatorio sur, y Arizona, Canarias, la India, México y el Tíbet para el norte. Algunas localizaciones fueron desestimadas con rapidez debido a la dificultad que presentaba llegar a ellas. El lugar propuesto en la India, por ejemplo, solo resulta accesible seis meses al año, y la entrada en el Tíbet sufre frecuentes restricciones por motivos políticos.

En el resto de los sitios se desplegaron instrumentos de monitorización atmosférica desarrollados específicamente para caracterizar las variables más relevantes para el proyecto CTA. A partir de dichas mediciones, así como de la información atmosférica y técnica disponible en los datos locales y de satélites, el Consorcio CTA elaboró una clasificación de todos los lugares propuestos. Con esa información, un comité internacional de expertos visitó los distintos emplazamientos y elaboró una recomendación final para las agencias de financiación de los países participantes. Tras varias iteraciones y reconsideraciones, el número de candidatos viables se redujo a tres emplazamientos en cada hemisferio y, por último, a solo dos. Finalmente, los sitios seleccionados fueron el desierto de Atacama y la isla de La Palma.

El observatorio sur se construirá en una planicie gestionada por el Observatorio Europeo Austral (ESO), a medio camino entre el cerro Paranal, sede principal del ESO, y el cerro Armazones, que en un futuro acogerá el mayor telescopio óptico del mundo, el E-ELT, de 39 metros [*véase* «La guerra de los telescopios», por K. Worth; Investigación y Ciencia, febrero de 2016]. Esa llanura permitirá construir sin problemas los más de cien telescopios de los que constará el observatorio CTA-Sur, si bien estos deberán ser capaces de resistir terremotos y fuertes vientos.



PÚLSAR DEL CANGREJO: La primera detección de rayos gamma de alta energía procedentes de una fuente astrofísica identificable no se logró hasta 1989, cuando el telescopio Whipple de Arizona captó la radiación de la nebulosa del Cangrejo, en la constelación de Tauro. El centro de la nebulosa se encuentra ocupado por un púlsar: una estrella de neutrones de apenas diez kilómetros de radio pero con una masa mayor que la del Sol y que rota a gran velocidad. Esta imagen en colores falsos muestra las emisiones en rayos X (*azul*) y en el visible (*rojo*) de la parte central de la nebulosa. El púlsar se halla el punto central que se aprecia en la imagen.

NASA/OBSERVATORIO DE RAYOS X CHANDRA/UNIVERSIDAD ESTATAL DE ARIZONA/JEFF HESTER ET AL. (*rayos X*); NASA/HUBBLE/UNIVERSIDAD ESTATAL DE ARIZONA/JEFF HESTER ET AL. (*visible*)

El CTA-Norte se ubicará en el Roque de los Muchachos, en la misma área que previamente ocupó HEGRA y en la que hoy se encuentran los telescopios MAGIC. En esta decisión han influido las excelentes condiciones de observación que han hecho del Roque de los Muchachos la cuna europea de la astronomía de altas energías, así como el apoyo del Instituto de Astrofísica de Canarias y de las autoridades nacionales y regionales. En particular, España se ha comprometido a cubrir con fondos de desarrollo de la Unión Europea el 40 por ciento del coste de construcción del CTA-Norte.

GRANDES TELESCOPIOS

Uno de los principales objetivos del proyecto CTA es ampliar el intervalo de energías de los rayos gamma que podemos estudiar desde la superficie terrestre. Para las energías más elevadas, superiores a 1000 GeV, la solución consiste en construir decenas de telescopios de poco tamaño. Pero, para las más bajas, de menos de 50 GeV, la clave pasa por aumentar las dimensiones de los espejos y aprovechar al máximo cada fotón que llega. Para ello, cada observatorio contará con cuatro LST, dotados de espejos de 23 metros y de fotodetectores extremadamente eficientes

Lluvias de rayos gamma

Al impactar contra las moléculas de la atmósfera terrestre, los rayos gamma de origen cósmico desencadenan una cascada de partículas secundarias tan energéticas que su velocidad supera a la de la luz en el aire. Como consecuencia, se genera una onda de choque electromagnética conocida como luz de Cherenkov, Su análisis permite reconstruir las propiedades de los rayos gamma originales y estudiar las fuentes que los producen. Con un observatorio en cada hemisferio terrestre y un total de más de 100 telescopios de última generación, el proyecto CTA podrá rastrear todo el cielo en rayos gamma y examinar con una sensibilidad sin precedentes dicha radiación en un amplio intervalo de energías.

Dos observatorios

El proyecto contará con un observatorio en cada hemisferio para poder así sondear todo el cielo. El observatorio norte se construirá en la isla canaria de la Palma; el sur, en el desierto de Atacama, en Chile.



Fuente cósmica

Rayo gamma

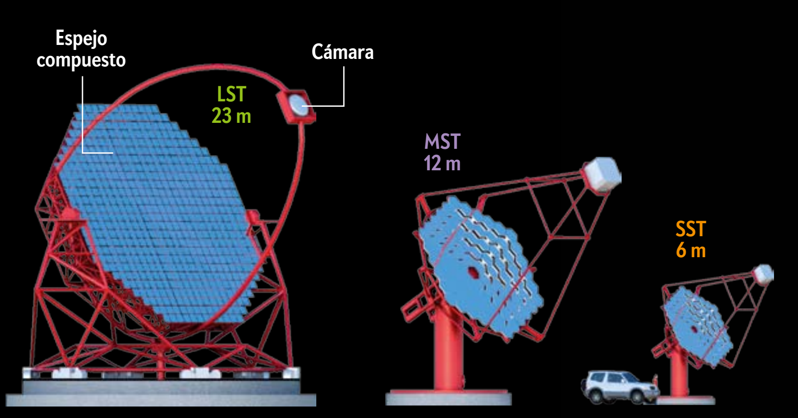
Capas altas de la atmósfera

Cono de luz de Cherenkov

Matriz de telescopios Cherenkov

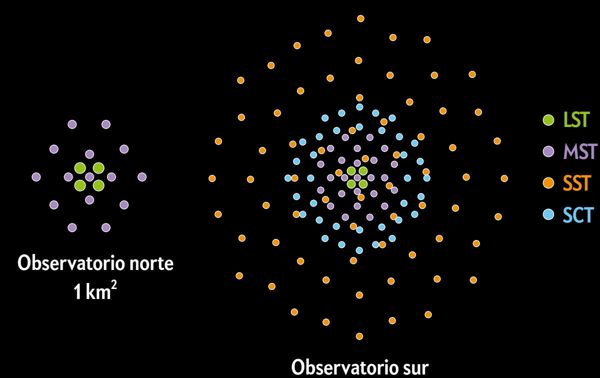
Varios tipos de telescopios

El proyecto contará con telescopios de tres tamaños: LST, de 23 metros de diámetro; MST, de 12 metros, y SST, de 6 metros (*abajo*). Cada uno de ellos ha sido diseñado para analizar rayos gamma de diferentes energías. Varios de los instrumentos MST del observatorio sur serán de tipo Schwarzschild-Couder, con dos reflectores en lugar de uno (*no mostrado*).



Disposición de los instrumentos

Los telescopios se repartirán en una superficie de hasta 1 kilómetro cuadrado en el observatorio norte y en una de hasta 10 kilómetros cuadrados en el observatorio sur. Este último acogerá todos los telescopios de menor tamaño, así como varios instrumentos medianos de tipo Schwarzschild-Couder (SCT).



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA (esquemas); G. PÉREZ/INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS/SMM (*telescopios y planta de los observatorios*); FUENTES: COLABORACIÓN CTA/FECYT

CTA-Norte en el Roque de los Muchachos

En julio de 2015, tras estudiar en detalle varias propuestas durante cuatro años, el Consorcio CTA decidió que el observatorio norte del proyecto se construiría en el Roque de los Muchachos, en la isla canaria de la Palma. La elección fue debida a las excelentes condiciones de observación de la isla y a la dilatada experiencia de las instalaciones canarias en astronomía de rayos gamma.

Las islas Canarias albergan dos observatorios excepcionales: el del Teide, en Tenerife, y el del Roque de los Muchachos. Ambos están administrados por el Instituto de Astrofísica de Canarias, el mayor centro de investigación astronómica de España y una institución de referencia internacional. Se benefician de unas condiciones de observación únicas, ya que se encuentran situados por encima del llamado «mar de nubes», lo que garantiza una atmósfera especialmente limpia y estable. Los observatorios están protegidos incluso por ley: la llamada Ley del Cielo restringe la contaminación lumínosa en Tenerife y La Palma.

En la actualidad, los observatorios acogen una veintena de telescopios ópticos, tanto nocturnos como diurnos (para estudios solares). Los mayores telescopios nocturnos se encuentran en el Roque de los Muchachos, cuyas condiciones atmosféricas también resultan ideales para la instalación de telescopios Cherenkov, ya que estos detectan luz visible o en el ultravioleta cercano.

El Roque de los Muchachos cuenta con más de veinte años de experiencia en astronomía de rayos gamma. En los años noventa albergó los telescopios Cherenkov del experimento HEGRA, pionero en su clase, y desde 2004 acoge los dos telescopios del experimento MAGIC, los cuales serán de gran ayuda para construir y calibrar los telescopios de CTA-Norte. Hoy por hoy, en todo el mundo solo operan tres observatorios Cherenkov: H.E.S.S., en Namibia; VERITAS, en Arizona, y MAGIC.

Los telescopios ópticos del Observatorio del Roque de los Muchachos se alinean a lo largo del borde del cráter del volcán extinto de la Caldera de Taburiente, a una altitud de unos 2400 metros. El CTA-Norte se construirá unos 200 metros más abajo, en una nava de montaña al pie de las cumbres más altas. Esta planicie constituye un área de casi un kilómetro cuadrado y disfruta de una pendiente más suave que el resto. El observatorio empezará a construirse este mismo año y sus instalaciones deberían estar operativas para principios de la próxima década.



Telescopios MAGIC en el Observatorio del Roque de los Muchachos.

en la captación de la luz visible y ultravioleta. Merece la pena señalar que hablamos de espejos inmensos: cada uno de ellos abarca la superficie de un campo de baloncesto.

Un aspecto fundamental en el diseño de los LST guarda relación con otro de los grandes objetivos del proyecto: la observación de estallidos de rayos gamma. Estas explosiones cósmicas de origen incierto se encuentran entre los sucesos más energéticos del universo: en pocos segundos, pueden emitir en rayos gamma una energía equivalente a la que radiará el Sol durante toda su vida. Se cree que se producen en explosiones de supernova en las que se eyecta un chorro de partículas a velocidades próximas a la de la luz, o bien durante el colapso de dos estrellas de neutrones en rotación mutua. El aspecto relevante para los LST reside en que tales estallidos duran menos de un minuto, por lo que el telescopio debe poder reorientarse hacia cualquier dirección del cielo en cuestión de segundos.

Lo anterior obliga a que la estructura mecánica que sujeta el espejo sea muy ligera pero, al mismo tiempo, resistente a fuertes aceleraciones y frenados. La solución estriba en un armazón prácticamente hueco formado por una red de tubos de fibra de carbono, muy ligeros y resistentes. Para complicar las cosas, deberán soportar vientos con velocidades cercanas a los 200 kilómetros por hora. Una estructura tan liviana y un espejo tan grande se parecen bastante a la vela de un barco. Y, de hecho, el telescopio podría salir volando si no se sujetara al suelo mediante un sistema de ruedas engarzadas a un raíl circular, como los vagones de una montaña rusa. Este sistema está siendo diseñado actualmente en Barcelona.

Comparado con los modernos telescopios que operan en el visible, el diseño óptico de un LST es muy sencillo: un solo espejo primario de forma parabólica colecta la luz de Cherenkov y la concentra en una cámara situada en el foco. Sin embargo, dado que es imposible construir un único espejo de 23 metros de diámetro, el de los LST estará segmentado en unas 200 teselas de dos metros cuadrados cada una, las cuales deberán ceñirse con precisión a la forma parabólica del reflector. Para ello, dos motores corregirán cada pocos minutos la orientación de la tesela en unos pocos micrómetros, sobre todo con miras a compensar la deformación que se induce cuando el telescopio cambia de orientación. Un láser infrarrojo disparará constantemente a la cámara desde el centro del reflector y servirá como referencia para orientar cada una de las teselas.

DANIEL LÓPEZ/INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS

Gracias a los LST, el proyecto irrumpirá en una ventana a la que hasta ahora solo podía accederse desde el espacio

Los telescopios MAGIC ya usan en la actualidad un sistema similar, aunque más sencillo.

La cámara que capta la luz de Cherenkov constituye uno de los elementos más complejos del LST. A pesar de detectar luz visible, se parece muy poco a las cámaras de los telescopios ópticos. Por cada rayo gamma que impacta en la atmósfera, suelen llegar al aparato varios centenares de fotones de luz de Cherenkov. Sin embargo, lo hacen en muy pocos nanosegundos, por lo que resulta imposible usar dispositivos de carga acoplada (CCD), como en un telescopio óptico. En su lugar, deben emplearse fotomultiplicadores: sensores capaces de detectar muy pocos fotones y con una respuesta temporal muy rápida. La electrónica que procesa la señal debe ser igualmente veloz. Teniendo en cuenta el fondo de rayos cósmicos, el número de eventos será del orden de decenas de miles por segundo: otro reto para la electrónica y para los ordenadores que manejarán el ingente flujo de datos.

Un arco de fibra de carbono sostendrá la cámara a 28 metros del espejo con una precisión de pocos milímetros. Cada vez que se detecte un estallido de rayos gamma, esa gigantesca diana deberá girar tan rápido como el espejo, por lo que la cámara tendrá que ser lo más pequeña y ligera posible. Reducir su peso a «solo» dos toneladas y su superficie a «solo» nueve metros cuadrados ha supuesto un nuevo quebradero de cabeza para los ingenieros.

La mecánica de la primera cámara se ha diseñado y se está construyendo en Madrid, y su integración con los fotomultiplicadores y la electrónica necesaria se realizará en Barcelona. Los componentes electrónicos se han diseñado y producido en Japón, Italia y España. En estos momentos, el equipo de CTA que diseña el LST (al que pertenecemos los autores y que está integrado por unos 150 físicos e ingenieros de Japón, España, Alemania, Francia, Italia, Brasil, Croacia, India y Suecia) trabaja a contrarreloj en la construcción de un primer telescopio que servirá como prototipo. Llamado LST1, este instrumento aspira a ser el primer telescopio de los ocho que operarán en los observatorios norte y sur. El calendario es muy exigente: la obra civil y la instalación de los sistemas mecánicos comenzarán este año y el LST1 debería estar funcionando en 2017, a fin de poder iniciar la construcción de los demás telescopios. El Roque de los Muchachos fue seleccionado para instalar el LST1 incluso antes de que se decidiese que albergaría el CTA-Norte. El observatorio no solo resulta fácilmente accesible desde Europa continental, sino que gran parte de la infraestructura necesaria ya se encuentra operativa y cuenta, además, con los telescopios MAGIC, los cuales serán de gran utilidad para calibrar el LST1.

UN FUTURO BRILLANTE

Hasta hace relativamente poco, la astronomía de rayos gamma era un dominio exclusivo de los detectores espaciales, como el telescopio Fermi, de la NASA. Los telescopios Cherenkov solo llevan unos veinte años complementando las observaciones espaciales y solo a energías muy elevadas, por encima de los 100 GeV, ya que los rayos gamma menos energéticos resultan difíciles de observar tras el escudo de la atmósfera terrestre. Dentro de pocos años, los mayores telescopios del proyecto CTA podrán detectar rayos gamma con energías inferiores a los 50 GeV, las menores jamás observadas desde el suelo. Irrumpirán así en una ventana a la que hasta ahora solo podíamos acceder desde el espacio.

Los telescopios terrestres presentan dos grandes ventajas con respecto a los satélites. En primer lugar, son mucho más baratos. Pero, además, cada matriz de cuatro LST podrá detectar cualquier rayo gamma que incida en un área de entre 1000 y 10.000 metros cuadrados. Los instrumentos espaciales, en cambio, ven limitada su área de observación a superficies de en torno a un metro cuadrado. Ello permitirá a los LST captar miles de rayos gamma por cada uno detectado desde un satélite, lo que resultará clave a la hora de estudiar fenómenos astronómicos muy rápidos. Aparte de las explosiones de rayos gamma, CTA podrá analizar los cambios repentinos en el brillo de los núcleos galácticos activos y en los sistemas binarios que emiten rayos X o gamma. En ellos, los procesos de acreción hacen que la energía se disipe con gran rapidez, lo que puede provocar grandes cambios de brillo en apenas unos minutos. De hecho, gran parte de las fuentes astrofísicas de rayos gamma son variables.

Durante los próximos años, el proyecto CTA desempeñará un indiscutible papel de liderazgo en el campo de la astronomía de rayos gamma y en física de astropartículas. Creemos que los réditos científicos, industriales y tecnológicos que siempre cabe esperar de todo proyecto de gran ciencia compensarán con creces el esfuerzo invertido en este programa de investigación.

El pasado mes de octubre, durante la ceremonia de la primera piedra del proyecto en el Roque de los Muchachos, el reciente premio nóbel Takaaki Kajita, de la Universidad de Tokio, señaló que la Red de Telescopios Cherenkov cuenta con el potencial científico necesario para generar varios descubrimientos merecedores de un Nobel. Esperamos que así sea. IyC

PARA SABER MÁS

Seeing the high-energy universe with the Cherenkov Telescope Array: The science explored with the CTA. Número monográfico dedicado al proyecto CTA. *Astroparticle Physics*, vol. 43, págs. 1-356, marzo de 2013.
Página web del proyecto CTA: **cta-observatory.org**
Página web de CTA-España: **observatorio-cta.es**

EN NUESTRO ARCHIVO

HEGRA: el Observatorio de Rayos Cósmicos de La Palma (Tenerife). Victoria Fonseca en *IyC*, marzo de 1997.
Telescopios MAGIC. Ignasi Reichardt y Elsa de Cea en *IyC*, agosto de 2010.
Un siglo de rayos cósmicos. Michael Friedlander en *IyC*, octubre de 2012.
Toda la luz del universo. Alberto Domínguez, Joel R. Primack y Trudy E. Bell en *IyC*, agosto 2015.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

Mente&Cerebro

Precio por ejemplar: 6,90 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito *
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria *
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica
MyC 69: Cartografía cerebral
MyC 70: Pensamiento creativo
MyC 71: El cerebro bilingüe
MyC 72: Musicoterapia
MyC 73: La neurociencia del futuro
MyC 74: El poder de las marcas
MyC 75: Evaluar la personalidad
MyC 76: Estimulación cerebral
MyC 77: El tacto
MyC 78: El concepto del alma

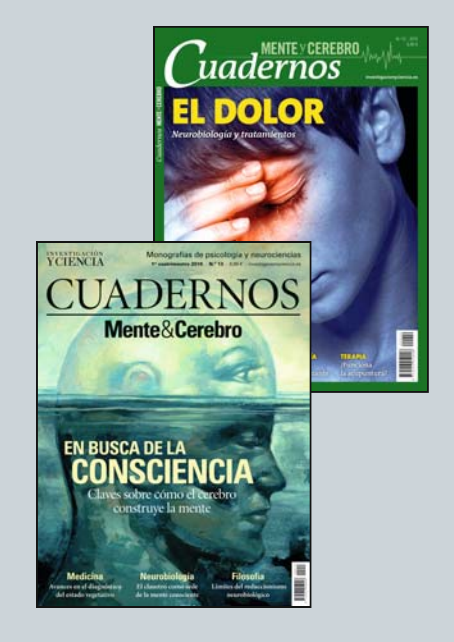
(*) Disponible solo en formato digital



CUADERNOS Mente&Cerebro

Precio por ejemplar: 6,90 €

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria
Cuadernos 10: Adicciones
Cuadernos 11: Lenguaje y comunicación
Cuadernos 12: El dolor
Cuadernos 13: En busca de la consciencia



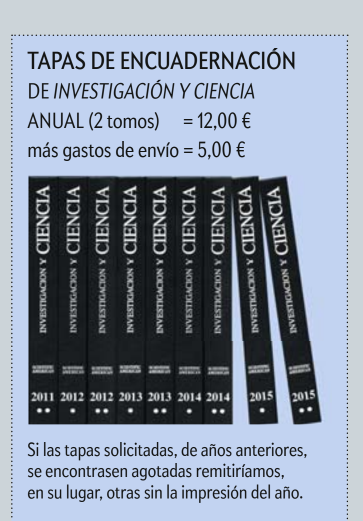


Hay disponibles ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,90€



CATÁLOGO DE PRODUCTOS

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN
DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 12,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

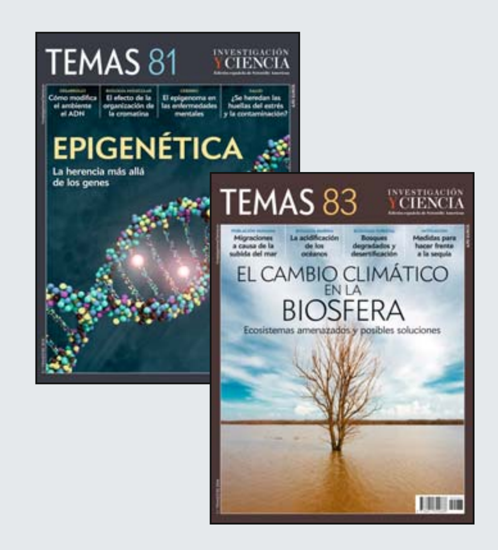


TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,90 €

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales *
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen? *
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner
T-78: Inteligencia animal
T-79: Comprender el cáncer
T-80: Grandes ideas de la física
T-81: Epigenética
T-82: La ciencia ante el cambio climático
T-83: El cambio climático en la biosfera

(*) Disponible solo en formato digital



GASTOS DE ENVÍO
(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1.er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Para efectuar tu pedido:
Teléfono: (34) 934 143 344
A través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es

por David Verdiell Cubedo y Javier Murcia Requena

Branquiópodos, los duendes de las charcas temporales

Estos pequeños crustáceos, adaptados a un medio fluctuante, se hallan amenazados en toda Europa

Las lagunas y charcas temporales son masas de agua de diferente extensión que se caracterizan por experimentar uno o más períodos de desecación a lo largo del año. En ellas se desarrolla una flora y fauna altamente especializada, capaz de proliferar en un medio sometido a constantes fluctuaciones. Un grupo destacado de invertebrados que las habitan son los branquiópodos, pequeños crustáceos dotados de una serie de apéndices poco diferenciados en el tórax (los toracópodos), que utilizan como medio de locomoción, alimentación y respiración; de ahí el nombre de branquiópodos, que significa «branquias en las patas».

Los branquiópodos de mayor tamaño, o grandes branquiópodos, despiertan especial interés porque proliferan casi exclusivamente en estas charcas. Están formados por tres grupos: los notostráceos, los espinicaudados y los anostráceos. Los primeros presentan un caparazón dorsal en forma de escudo, y su tronco finaliza con dos largos filamentos denominados cercópodos. En los espinicaudados, el caparazón está comprimido lateralmente y consta de dos valvas que cubren todo el cuerpo. Los anostráceos, vulgarmente conocidos como «gambas duende» (del inglés, *fairy-shrimps*), carecen de caparazón y muestran un marcado dimorfismo sexual: los machos tienen unas antenas modificadas a modo de pinzas que utilizan para asirse a las hembras durante la cópula; estas presentan un ovisaco muy conspicuo que contiene los huevos, sometidos a un movimiento continuo para favorecer su oxigenación.

Los hábitats ocupados por los grandes branquiópodos presentan una enorme fragilidad y se hallan amenazados en toda Europa, a causa, principalmente, de las actividades agrícolas, el desarrollo urbanístico y la introducción de especies exóticas. En la actualidad, los autores centran parte de su labor investigadora en el estudio y divulgación de la gran biodiversidad que atesoran estos ecosistemas.

—David Verdiell Cubedo
Asociación Columbares, Murcia
—Javier Murcia Requena
Redactor de aQua *y fotógrafo submarino*

FOTOGRAFÍAS DE JAVIER MURCIA REQUENA



EN LAS CHARCAS TEMPORALES como esta de las estribaciones de la sierra del Gigante, en Murcia, proliferan los grandes branquiópodos. En zonas de clima mediterráneo, los ganaderos las crean a menudo para abrevar a los animales.



EL GÉNERO *ARTEMIA* es el único representante de los anostráceos que habita sistemas acuáticos permanentes, como los de las salinas costeras y lagunas hipersalinas de interior. En la imagen, una hembra con la puesta de huevos en la parte inferior.



LOS NOTOSTRÁCEOS, como los del género *Triops* (del griego «tres ojos»), presentan un caparazón en forma de escudo, una morfología muy peculiar que apenas ha sufrido cambios desde sus orígenes, hace unos 200 millones de años, razón por la cual son considerados «fósiles vivientes».

LAS «GAMBAS DUENDE», o anostráceos, carecen de caparazón y poseen un marcado dimorfismo sexual: mientras que el macho del anostráceo *Streptocepalus torvicornis* presenta dos antenas modificadas que utiliza para el apareamiento sexual (*derecha*), la hembra cuenta con un ovisaco conspicuo desde el que libera los huevos al agua (*arriba*).

por José Díez

José Díez es profesor de filosofía de la ciencia de la Universidad de Barcelona



Las leyes en ciencia

Las leyes científicas hacen referencia a regularidades naturales no accidentales. ¿Dónde radica su necesidad?

En un artículo anterior hablamos de los conceptos científicos. La ciencia usa los conceptos para describir hechos particulares y formular leyes. Por ejemplo, hechos particulares son los que quedan descritos por enunciados como «Venus sigue una trayectoria elíptica» o «Esta barra de hierro se ha dilatado al calentarse». Pero, si la ciencia solo hiciese afirmaciones particulares, no sería muy interesante: se limitaría a elaborar listados de fenómenos. La ciencia hace algo más: formula hipótesis y leyes, las cuales combina después en conjuntos más amplios o teorías. Así, con los conceptos de fuerza, masa y distancia se formula la ley de la gravitación de Newton, $F = Gm_1m_2/r^2$.

En ocasiones se usa la palabra *hipótesis* para referirse a las conjeturas aún no confirmadas, mientras que se reserva el término *ley* para las que ya lo están. También cabe distinguir entre el *enunciado legaliforme*, esto es, la formulación lingüística de la ley, y el *contenido* o *hecho* que sucede en la naturaleza y que queda descrito por ese enunciado. Para simplificar, no tendremos en cuenta aquí estas distinciones.

Hechas estas precisiones, podemos preguntarnos: ¿qué es una ley? La descripción de la trayectoria de Venus no enuncia una ley, sino un hecho particular. En cambio, enunciados como la ley de gravitación, (1) «Los planetas se mueven en trayectorias elípticas con el Sol en uno de sus focos» o (2) «Los metales se dilatan al calentarse» sí expresan leyes. Las leyes corresponden a cierto tipo de hechos generales, expresados mediante enunciados también generales de la forma «Todos los... son...», «A todos los... sometidos a... les sucede...», etcétera.

¿Por qué decimos que las leyes corresponden a hechos generales «de cierto tipo»? Porque no toda regularidad es una ley natural. Por ejemplo, (3) «Ningún soltero está casado», (4) «Todo triángulo tiene tres lados», (5) «Todas las monedas que tengo ahora en mi bolsillo derecho son doradas» o (6) «Siempre que muere un ave, después nace un mamífero» expresan hechos generales. Pero, a diferencia de (1) y (2), no corresponden a leyes. La diferencia reside en que los hechos generales declarados en (1) y (2) contienen cierta clase de *necesidad natural*, mientras que el resto, o bien no contienen ninguna necesidad, como sucede en (5) y (6), o la que encierran no es una necesidad de la naturaleza, como ocurre en (3) y (4).

Los enunciados (5) y (6) refieren hechos generales que no suceden necesariamente. Suceden, por así decirlo, por casualidad: no hay ninguna conexión necesaria entre el antecedente y el consecuente. Las monedas que tengo ahora en mi bolsillo son de hecho doradas, pero podrían no serlo. Y es un hecho que, tras morir un ave, siempre nace un mamífero, pero podría no suceder así (bastaría con que se extinguiesen los mamíferos). Se trata de regularidades accidentales, carentes de necesidad. Por otro lado, en (3) y en (4) sí se da una conexión necesaria entre antecedente y consecuente, pero esa necesidad no es natural, sino lingüística: su verdad se deriva de lo que significan las palabras. Decimos en estos casos que se trata de verdades *analíticas*, *semánticas* o *conceptuales*; su negación es una contradicción conceptual.

Si volvemos a (1) y (2), veremos que, aunque no se trata de enunciados accidentalmente verdaderos, sino necesariamente verdaderos, tampoco son analíticamente verdaderos. Las palabras *planeta*, *trayectoria*, *elipse* y *foco* podrían significar lo mismo y, si el mundo fuese diferente, (1) podría ser falsa. Es decir, las negaciones de (1) y (2) no son contradicciones conceptuales. De hecho, significando lo mismo esas palabras, durante siglos se pensó que los planetas se comportaban de otra manera. Así pues, aunque se trata de generalizaciones necesariamente verdaderas, no son analíticamente verdaderas, sino *nomológicamente* (de *nomos*, «ley» en griego) verdaderas. Son leyes de la naturaleza: necesarias en virtud de cómo es esta.

¿Cómo reconocer que una generalización verdadera es una ley? El rasgo principal de las generalizaciones analíticamente verdaderas es relativamente sencillo de entender: basta con saber el significado de las palabras para reconocer su verdad. Pero (1) y (2) no son así; se puede entender lo que dicen sin saber si son verdaderas o no. Eso facilita la distinción entre las leyes y las regularidades analíticas. Pero ¿cómo diferenciarlas de las regularidades accidentales? ¿Cómo saber si un enunciado como «Todos los cisnes son blancos» se refiere a una ley o a un accidente?

Aunque se trata de una cuestión compleja, hay algunos rasgos que, intuitivamente, distinguen la ley natural de la generalización accidental. Dos de ellos son la capacidad predictiva y la capacidad explicativa.

Si estamos dispuestos a predecir nuevos casos sobre la base de casos anterio-

res, entonces es que consideramos que la generalización no es casual, sino nomológica. Supongamos que todas las monedas que tengo ahora en mi bolsillo derecho son doradas. ¿Apostaría el lector a que la próxima que introduzca en mi bolsillo también será dorada? Si la respuesta es negativa, es porque considera que dicha regularidad es accidental, no producto de una ley. Suponga ahora que la regularidad de «Todas las piezas de cobre pulido son doradas» ha sido constatada siempre. ¿Estaría dispuesto a apostar a que la próxima pieza de cobre pulido que encuentre será dorada? Si la respuesta es afirmativa, es porque considera que esa regularidad no es accidental, sino nomológica.

En segundo lugar, en la medida en que estemos dispuestos a usar una regularidad para dar explicaciones, la estaremos considerando nomológica, no accidental. Ante la pregunta «¿Por qué esta pieza de metal es dorada?», la respuesta «Porque está en mi bolsillo derecho y todas las monedas que tengo allí son doradas» no parece una buena explicación. En cambio, algo como «Porque es de cobre pulido y todas las piezas de cobre pulido son doradas» sí que lo parece. Ello se debe a que consideramos que «Todas las piezas de cobre pulido son doradas» corresponde a una ley, mientras que «Todas las monedas de mi bolsillo derecho son doradas» parece referir a un mero accidente.

Existen varios tipos de leyes. Las leyes que llamamos *estrictas*, como la ley de la gravitación, no presentan excepciones: siempre que se da el antecedente, ocurre el consecuente. Pero no todas las leyes son de este tipo. Por ejemplo, que la ingesta de barbitúricos va acompañada de somnolencia no constituye una correlación accidental: hay una conexión genuina entre una cosa y la otra. Sin embargo, no es cierto que siempre que alguien ingiere barbitúricos sufra somnolencia. Ocurre así en condiciones normales, pero tal vez no sea el caso si, por ejemplo, también se han tomado estimulantes.

Tales correlaciones son nomológicas; son leyes, pero no estrictas. Reciben el nombre de leyes *ceteris paribus*, que significa «en condiciones normales» (literalmente, «cuando todo lo demás sigue igual»), o leyes *cp*. Se pueden esquematizar así: «Todos los... son, *cp*, ...» o «Siempre que... entonces, *cp*, ...». Muchas de las leyes cotidianas son leyes *cp*. La ingesta de analgésicos redime el dolor, pero solo en condiciones normales. También que los metales se expanden al calentarse sucede solo en condiciones normales (a presiones extremas podría no ocurrir).

Una cuestión debatida es si las leyes *cp* son irreducibles o si, más bien, constituyen versiones simplificadas de leyes estrictas en las que desconocemos parte del antecedente. Así, la ley «Todos los *A* son, *cp*, *B*», constituiría una versión provisional de la ley estricta «Todos los que son a la vez *A* y ? son también *B*», de la que desconocemos parte del antecedente. Por ejemplo, «Fumar en exceso produce, *cp*, cáncer» correspondería a una ley no estricta tras la que habría otra que sí lo es: «Fumar en exceso cuando el organismo presenta tales y cuales condiciones produce (sin excepciones) cáncer».

Otro tipo de leyes son las llamadas *probabilísticas* o *estadísticas*, como «El 75 por ciento de los guisantes que resultan de cruzar amarillos y verdes salen verdes» o «El 90 por ciento de los electrones disparados contra una barrera de potencial rebotan». No se trata de hechos casuales, sino de correlaciones dotadas de una necesidad natural. Son leyes, pero no del mismo tipo que la ley de la gravitación. En muchos casos, el guisante saldrá verde o el electrón rebotará, pero no en todos. Podemos representar estas leyes mediante la forma «El *X* por ciento de los... son...», «La probabilidad de que suceda... si ha sucedido... es *p*», etcétera.

También se debate si las leyes estadísticas corresponden a relaciones probabilísticas irreducibles o si, más bien, reflejan nuestro desconocimiento de algunos factores. Por ejemplo, «Al menos el 80 por ciento de los fumadores intensivos de larga duración desarrolla enfermedades respiratorias» expresaría una correlación nomológica estadística. Pero, si conociésemos mejor las condiciones de los sujetos, podríamos formularla de modo absoluto, no estadístico: «La totalidad de quienes fuman en exceso y cumplen tales y cuales condiciones desarrollan enfermedades respiratorias».

No obstante, aunque lo anterior pueda funcionar para una gran cantidad de leyes probabilísticas, no queda claro que pueda aplicarse a todas. Numerosos filósofos defienden que las leyes de la mecánica cuántica son irreduciblemente probabilísticas: no expresan un desconocimiento parcial, sino relaciones necesarias, «brutas», de la naturaleza. Este constituye uno de los aspectos más misteriosos y debatidos de la mecánica cuántica.

Concluiremos con la mención de una cuestión más filosófica, relativa a las leyes naturales: ¿dónde radica su necesidad? ¿A qué nos referimos cuando hablamos de la necesidad natural? En el mundo observamos fenómenos y vemos que unos siguen a otros, pero no *vemos* conexiones necesarias entre ellos. Tanto en el caso de la muerte de las aves y el nacimiento de los mamíferos como en el de la expansión de los metales, lo que observamos es lo mismo: primero ocurre una cosa y luego otra. Consideramos que en el segundo hay una necesidad de la que el primero carece, pero no vemos dicha necesidad.

Los empiristas radicales, como David Hume, sostienen que en el mundo hay fenómenos y regularidades. Sin embargo, no consideran que haya regularidades que, además, tengan adherida una propiedad a la que podamos llamar «necesidad». Lo que denominamos leyes son meras regularidades que, entre todas las disponibles, tomamos para construir los sistemas predictivos más simples y exitosos. Las leyes serían las «regularidades que pertenecen al mejor sistema predictivo» (*best system account*).

Pero ¿por qué funciona mejor un sistema predictivo con unas regularidades que con otras? Para el realista, de inspiración aristotélica, esto último carece de explicación a menos que supongamos que el mundo contiene en sí mismo tales necesidades («causas», o como queramos llamarlas). Por tanto, nuestras leyes científicas funcionarán mejor cuanto más se aproximen a esas necesidades naturales. En la ciencia ideal —a la que quizá no se llegue nunca, pero a la que continuamente nos vamos acercando—, las leyes captarán exactamente esas necesidades. Al empirista, en cambio, todo esto le parece mala metafísica. Y el debate continúa. IyC

PARA SABER MÁS

Philosophical foundations of physics. R. Carnap. Basic Books, 1966.
Philosophy of natural science. C. G. Hempel. Prentice Hall, 1966.
The structure of science. E. Nagel. Hacket Publishing, 1979.
Fundamentos de filosofía de la ciencia. J. Díez y C. U. Moulines, 3.ª edición. Ariel, 2008.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los límites de la razón. Gregory Chaitin en *IyC*, mayo de 2006.
¿Puede la ciencia explicarlo todo? Jesús Zamora Bonilla en *IyC*, enero de 2013.
Los conceptos científicos. José Díez en *IyC*, enero de 2014.

por Ernesto Páramo Sureda

Ernesto Páramo Sureda es director del Parque de las Ciencias de Granada desde su fundación, en 1992, y miembro de la dirección de la Red Europea de Centros de Ciencia y Museos, desde 2011.



Museos de ciencia, hoy

Son instrumentos valiosos para que la ciencia gane respaldo en nuestro país

Para muchos, los museos de ciencia son criaturas interesantes pero prescindibles, un pequeño lujo que se pueden permitir las sociedades ricas. Muy al contrario, me propongo argumentar aquí que en países como el nuestro estos centros pueden ser de gran utilidad e impulsar el sistema de I+D+i. Pero sé bien que con la comunicación social de la ciencia ocurre como con la ciencia básica: no resulta nada fácil comprender su importancia.

Hoy en día, parece una quimera lograr que en España se respalde la ciencia con la intensidad y la constancia necesarias. Si se tiene en cuenta la enorme competitividad en la asignación de los recursos públicos, es un error pensar que el apoyo llegará de forma espontánea o por reclamarla a los Gobiernos. En el fondo, en las democracias contemporáneas es la sociedad la que debe respaldar las grandes inversiones. Por ello, es una prioridad incrementar el apoyo social a la ciencia y hacer más visible su vínculo con el progreso. Defiendo que necesitamos una estrategia fuerte y sostenida, y que los museos científicos deben formar parte de ella.

En una mirada histórica hacia estos centros, debemos destacar el Exploratorium de San Francisco, fundado en 1969 por Frank Oppenheimer y considerado el *big bang* de los museos interactivos [*véase* «La inocencia de pulsar un botón», por Jaume Sastre, *en este mismo número*]. Gracias a su energía creativa y al éxito de público, su onda expansiva acabaría llegando a todos los rincones del planeta. Hoy hay unos 3000 en todo el mundo. No fue un fenómeno aislado, sino la cristalización de un amplio movimiento en favor de la renovación educativa en el campo de las ciencias. Se buscaban nuevos métodos para atraer a los escolares o al público general con la participación directa en experimentos diseñados al efecto. Los grandes museos históricos, como el Museo de Ciencias de Londres, el Museo Alemán de Ciencia y Tecnología, en Múnich, o el Palacio de los Descubrimientos, en París, también hacía tiempo que trataban de acercar al público los principios de la ciencia por medios novedosos, no solo mediante la exposición de los tesoros de sus colecciones. Al situar el centro de gravedad en las preguntas de la ciencia, los museos interactivos dejaron de necesitar las colecciones históricas, y se hicieron fácilmente replicables. (Hoy se ha producido una feliz convergencia entre colecciones e interactividad, pero esa es otra historia.)



PARQUE DE LAS CIENCIAS, GRANADA

En España, el panorama de los museos científicos en los años setenta era desolador. Pero, aunque tarde, la ola innovadora llegó y, ¡de qué manera! Nuestro país se incorpora a este fenómeno en 1981 con la inauguración del Museo de la Ciencia de La Caixa, en Barcelona, del que beberán otros proyectos: La Coruña, Tenerife, Granada, Murcia, Valencia, Cuenca, Valladolid, Madrid, San Sebastián, Málaga, Las Palmas, Logroño, Teruel, Sevilla, Orihuela o Burgos. Se crea el Museo de la Ciencia y de la Técnica de Cataluña, con cabecera en Tarrasa, una institución que vincula museos y patrimonio industrial. Museos históricos con grandes colecciones, como los de ciencias naturales de Madrid y Barcelona, se suman a este impulso renovador, como también los jardines botánicos o los planetarios de Madrid, Pamplona y Castellón. Asimismo, se abren sedes de la red del Museo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Liberados de la obligación de ser exhaustivos gracias a la era Internet, los museos pueden ahora centrarse en la experiencia personal y social como núcleo vital de su existencia. El museo como espacio físico se ha vuelto mucho más codiciado. Los centros modernos son una auténtica navaja suiza, un cruce entre centro cultural, museo clásico, medio de comunicación, centro educativo, laboratorio o foro de debate. En su práctica diaria, apoyan al sistema educativo formal, pero también alientan la curiosidad y el interés del público, despiertan vocaciones, canalizan iniciativas diversas y promueven una mejor percepción de la ciencia y la tecnología. Sin duda, constituyen una herramienta impagable para una estrategia nacional en favor de la ciencia y de la cultura científica. ¿Qué podríamos hacer para que resulten más útiles a la sociedad?

Propongo cuatro intervenciones básicas: articular y apoyar una sólida red nacional de museos y centros de divulgación científica; promover la internacionalización y la participación en los proyectos europeos (en este sentido, la Red Europea de Centros de Ciencia y Museos, ECSITE, constituye una alianza fundamental); disponer de una ley de mecenazgo para la cultura científica; y promover, desde el Gobierno y las Comunidades Autónomas, un plan nacional de cultura científica de al menos una década de duración. Un plan ambicioso que involucre a los museos, las universidades, la comunidad científica, la industria, los medios de comunicación y el sistema educativo.

Los museos son hoy un cruce virtuoso entre educación, ciencia y comunicación social. Lo inteligente sería apoyarlos con firmeza para que la sociedad pueda sacar el máximo provecho de ellos.

TECNOLOGÍA BIOMÉDICA

Breve historia de la criomicroscopía electrónica

Considerada método del año 2015 por la revista *Nature Methods*, los recientes avances en esta técnica permiten obtener imágenes de estructuras moleculares con una resolución extraordinaria

Eva Nogales

EN SÍNTESIS

La criomicroscopía electrónica se ha erigido en los últimos veinte años como una técnica idónea para el estudio de estructuras macromoleculares con precisión atómica.

Ya no es preciso cristalizar la muestra ni disponer de un gran volumen de la misma. Ello supone una gran ventaja a la hora de estudiar estructuras nanométricas.

Los grandes avances técnicos en la captación de las imágenes y la potencia de cómputo han facilitado la elaboración de modelos tridimensionales a partir de las imágenes planares.

ESTRUCTURA MOLECULAR de la enzima bacteriana beta-galactosidasa. Esta imagen compuesta revela los avances recientes de la criomicroscopía electrónica, que han logrado aumentar la resolución de la estructura más de diez veces (*naranja*), en comparación con hace unos pocos años (*azul*).

Eva Nogales trabaja en el departamento de biología celular y molecular de la Universidad de California en Berkeley, en el Instituto Médico Howard Hugues y en la división de biofísica molecular y bioimagen del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, en California.



La criomicroscopía electrónica se ha erigido durante los dos últimos decenios en una técnica idónea para el estudio de los sistemas complejos que desafían la caracterización estructural. Las recientes mejoras introducidas en ella suponen un salto de gigante en términos de aplicabilidad, rendimiento y resolución, por lo que ha despertado un gran interés en todo el mundo y ha sido considerada método del año por la revista *Nature Methods*. El presente artículo expone algunos de los hitos en el campo de la criomicroscopía electrónica que le han granjeado su éxito actual.

UN NICHO ÚNICO EN LA BIOLOGÍA ESTRUCTURAL

Con el fin de visualizar la arquitectura de los complejos macromoleculares, se han desarrollado técnicas de biología estructural que han demostrado ser un recurso inapreciable a la hora de brindarnos una comprensión mecanicista de la función biomolecular. Hasta la fecha, el método más común para desentrañar la estructura de las macromoléculas a escala atómica ha sido la cristalografía de rayos X. Pero esta técnica exige una muestra abundante y la cristalización de las proteínas, que a menudo dista de ser sencilla. Por su parte, la resonancia magnética nuclear (RMN) no requiere cristalización, pero sí el enriquecimiento isotópico, aparte de una gran cantidad de muestra, y las limitaciones de tamaño la han restringido en general a proteínas y moléculas de ARN pequeñas o a dominios aislados. Los inconvenientes de estas técnicas clásicas dificultan o imposibilitan su aplicación a los complejos grandes, las proteínas integrales de membrana, los polímeros y los complejos macromoleculares donde concurren composiciones o conformaciones diversas.

La criomicroscopía electrónica de partículas aisladas ha emergido en las dos últimas décadas como una técnica de biología estructural aplicable al estudio de los sistemas biológicos complejos porque obvia la cristalización y solo precisa pequeñas cantidades de muestra. Los últimos avances en instrumentación y programación han mejorado enormemente la capacidad de la criomicroscopía electrónica para dilucidar estructuras de partículas aisladas, con resoluciones que permiten la modelización atómica directa en los mapas de densidad, y también para lidiar con mezclas de composición y conformación diversa. Además, el tiempo para desentrañar la estructura ha disminuido notablemente con la automatización de la adquisición y del procesamiento de los datos, así como gracias al menor número de imágenes de partículas requerido para obtener una señal de alta resolución (gracias a nuevas técnicas de detección). Las bases de datos se están colmando a un ritmo inédito de nuevas estructuras aportadas por la criomicroscopía electrónica, entre ellas las de complejos macromoleculares críticos que hasta hace muy poco se consideraban metas fantasiosas. Nos hallamos ante un enorme avance en términos de aplicabilidad, rendimiento y resolución de dicha técnica, lo que la sitúa en el centro de atención de la comunidad científica internacional.

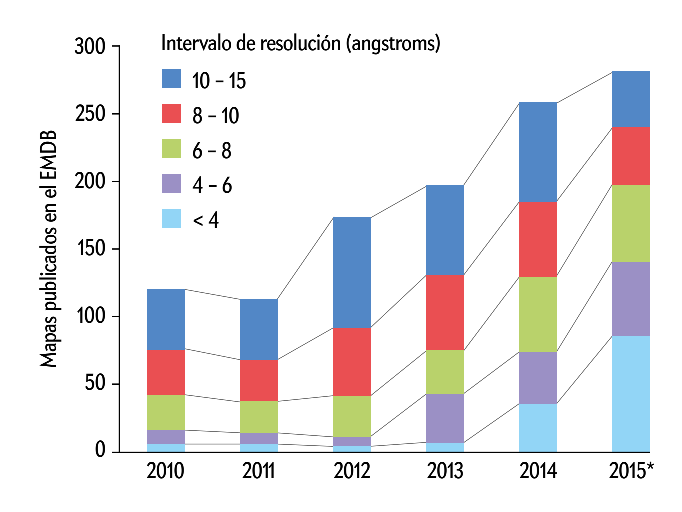
En las páginas siguientes comparto con el lector mi visión personal sobre las etapas históricas que marcan el desarrollo de la microscopía electrónica de reconstrucción tridimensional (3D), y que a la postre han propiciado el éxito actual de la técnica. Esta narración pretende ser un relato conciso de las muchas contribuciones al progreso de este campo realizadas por numerosos laboratorios.

PREPARAR LAS MUESTRAS

Los especímenes biológicos pueden visualizarse directamente a escala molecular con la microscopía electrónica de transmisión. Las imágenes captadas representan proyecciones bidimensionales del objeto y, al combinar por ordenador varias imágenes proyectadas desde diferentes ángulos (vistas), se obtiene una reconstrucción en tres dimensiones. A finales de los años sesenta del siglo xx, David DeRosier y Aaron Klug, del Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas del Reino Unido (LBM-CIM), usaron transformadas de Fourier-Bessel para combinar múltiples vistas de las moléculas que conforman la cola helicoidal del bacteriófago T4. Con ello nacía la reconstrucción tridimensional mediante microscopía electrónica.

Pero hubo que vencer tres obstáculos metodológicos importantes para consolidar la técnica como método general: primero era preciso preservar la muestra en las condiciones de ultravacío en las que opera el microscopio; también se debía minimizar el daño causado por los electrones de alta energía que impactan contra ella; y, por último, se necesitaba un mecanismo para compensar el escaso contraste de las muestras biológicas, que por su abundancia en elementos ligeros dispersan los haces de electrones de modo similar al fondo acuoso.

La primera solución práctica, utilizada por DeRosier y Klug y aún aplicada en ciertos especímenes, consistió en aplicar como colorante sales de átomos pesados (acetato de uranilo, por ejemplo) para crear una especie de molde seco de las moléculas antes de introducir la muestra en el microscopio. La tinción con

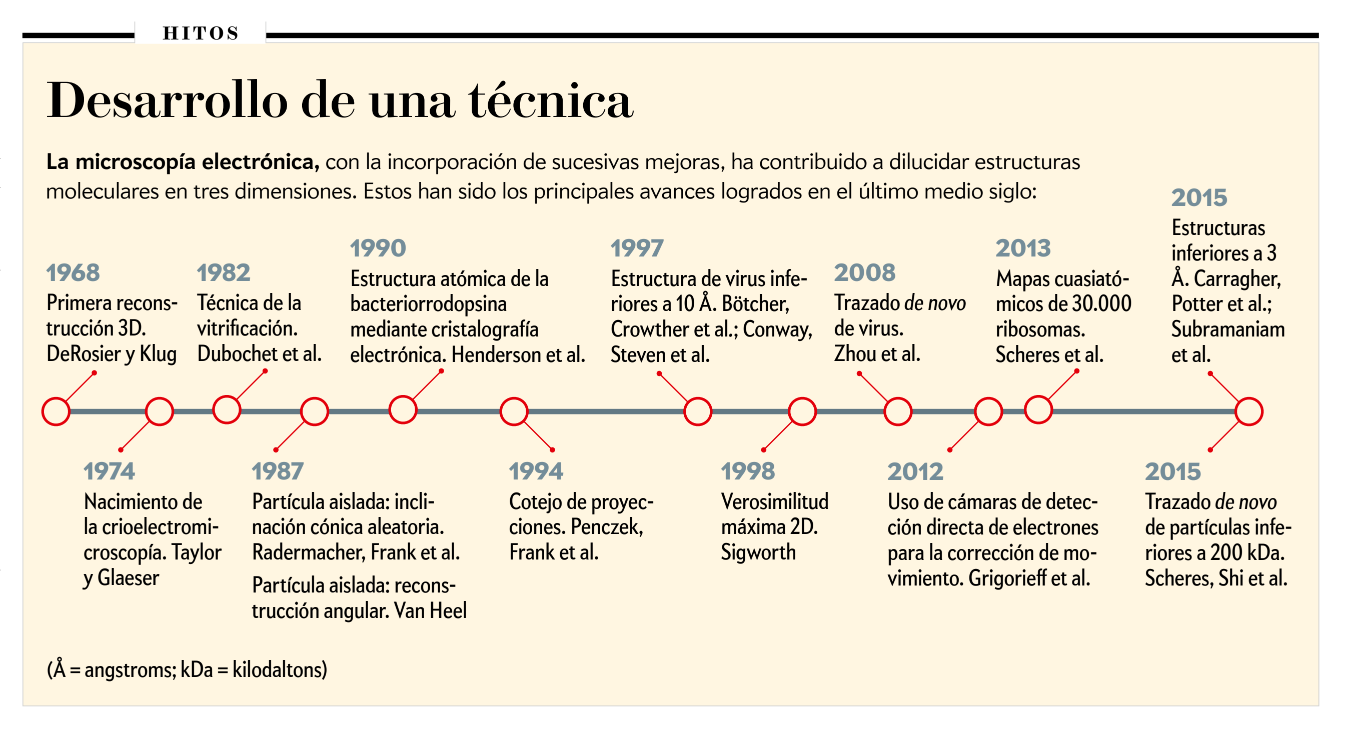


EL NÚMERO DE MAPAS de estructuras moleculares obtenidos a partir de microscopía electrónica y depositados en el Banco de Datos de Microscopía Electrónica (EMDB; http://emdatabank.org) ha ido aumentando en los últimos seis años. El incremento más notable se ha producido en los últimos dos años para las estructuras con resoluciones inferiores a 4 angstroms. (El asterisco indica que los datos de 2015 están incompletos; llegan hasta el 14 de octubre.)

metales pesados reduce el problema del daño por la radiación, pues esta incide sobre el recubrimiento inorgánico y no sobre la proteína. Además, este método genera una imagen de alto contraste debido al elevado número atómico del uranio (puesto que las proteínas producen una menor dispersión que el colorante, el contraste aparece invertido, de ahí que el método sea conocido como «tinción negativa»). Sin embargo, este procedimiento conlleva un coste, ya que la tinción puede no ser homogénea o penetrar en pequeñas cavidades de la muestra y el secado puede destruir las estructuras. Y lo que es más importante: la resolución se ve limitada por el tamaño del grano de la sal del átomo pesado (a unos 15 angstroms, en el mejor de los casos).

El avance que abrió la puerta a la dilucidación de las estructuras con alta resolución provino de la demostración, de la mano de Kenneth Taylor y Robert Glaeser, del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LNLB), en California, de que la criogenia de las muestras hidratadas permitía conservar las características de alta resolución en las proteínas. Este descubrimiento marcó el inicio de la criomicroscopía electrónica. Un trabajo posterior dirigido por Jacques Dubochet, del Laboratorio Europeo de Biología Molecular, en Heidelberg, dio lugar a un método práctico para la vitrificación del material biológico (generar películas finas de solución que inmediatamente se sumergían en criógenos potentes, como el etano o el propano líquidos). Junto con la comercialización de crioetapas estables, tales progresos contribuyeron a la difusión de la criomicroscopía electrónica y sus aplicaciones.

Las muestras helicoidales, los virus y los cristales bidimensionales constituyeron los especímenes favoritos antes del pleno desarrollo de la metodología de reconstrucción 3D. Merece una mención especial el trabajo pionero de Richard Henderson, del LBM-CIM, y sus colaboradores sobre el desarrollo de la cristalografía electrónica 2D, que a la postre desveló la estructura atómica de la bacteriorrodopsina, que fue durante muchos años el modelo de referencia para los receptores de siete hélices acoplados a proteínas G [*véase* «Arquitectos de la comunicación celular», por Javier González Maeso; Investigación y Ciencia, marzo de 2016]. Henderson y sus colaboradores usaron una combinación de imágenes y patrones de difracción electrónica de cristales bidimensionales. Entre las dificultades de la técnica figuran la necesidad de inclinar la muestra para captar diversas vistas de la molécula y el requisito de conseguir cristales bidimensionales perfectamente planos (algo nada sencillo, puesto que suelen tener el espesor de una sola proteína). Por ello, la cristalografía electrónica solo ha podido desentrañar un puñado de estructuras, y solo unas pocas de ellas con resolución atómica. Con todo, ha dado varios modelos atómicos de gran importancia biológica, como son el del complejo captador de luz en plantas y el de la tubulina, así como la estructura de



CORTESÍA DE C. LAWSON; REIMPRESO DE BRILOT ET AL. EN *J. STRUCT. BIOL.* N.º 177, PÁGS. 630-637, 2012; MODIFICADO POR *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

mayor resolución obtenida hasta la fecha con la microscopía electrónica 3D, la de la acuaporina 0 a 1,9 angstroms, lograda por Tom Walz y Steve Harrison, de la Escuela de Medicina de Harvard. Una ventaja de la cristalografía electrónica es que posibilita el estudio de las proteínas integrales de membrana en su entorno natural, como fue en el caso de la bacteriorrodopsina y de la acuaporina 0.

Con la criomicroscopía electrónica también se han resuelto, casi hasta la escala atómica, algunas disposiciones helicoidales ordenadas que pueden considerarse cristales unidimensionales (naturales o artificiales). Entre ellas se cuenta el receptor de la acetilcolina, analizado por Unwin, del LBM-CIM. Su trabajo incluía un estudio con resolución temporal que recurría a un proceso de congelación rápido para capturar el canal abierto antes de la inactivación. Los virus icosaédricos, cuya gran simetría supone una ventaja a la hora de alinear las partículas y amplificar la señal en la reconstrucción final, fueron las primeras muestras no cristalizadas con las que se superó la barrera nanométrica. Ello permitió visualizar la estructura secundaria de las proteínas y, a la larga, obtener mapas de densidad con resolución

FUNDAMENTO

Así funciona la criomicroscopía electrónica

Una breve revisión de la técnica y las fases que conlleva

ALLISON DOERR

Durante décadas, la cristalografía de rayos X reinó como técnica dominante para extraer información de alta resolución sobre la estructura de las macromoléculas. La criomicroscopía electrónica de partículas aisladas se empleaba tradicionalmente para desentrañar la morfología de los grandes complejos proteicos que se resistían a la cristalización, si bien la resolución obtenida era sustancialmente peor que con la cristalografía. Aunque la estrategia general no ha variado de modo apreciable a lo largo de los años, los últimos avances técnicos en la preparación de muestras, en computación y, sobre todo, en la instrumentación están posibilitando el uso de la criomicroscopía electrónica para la resolución de estructuras macromoleculares con una resolución cuasiatómica.

Primer paso: preparación de la muestra

Un experimento de criomicroscopía electrónica empieza con una muestra de proteína purificada. La solución proteica se deposita en una rejilla especial que consiste en una lámina microperforada (normalmente de carbono amorfo) encajada en un soporte metálico. En el caso ideal, las partículas de proteína se reparten uniformemente por los orificios de la rejilla siguiendo distintas orientaciones. A continuación, la rejilla se sumerge en un criógeno, como etano líquido, que la ultracongela instantáneamente y deja, así, atrapadas las partículas en una fina película de hielo amorfo. Además de capturar la estructura de la proteína en el momento de la congelación, el proceso protege hasta cierto punto la muestra del daño por radiación y evita la evaporación de la solución tamponadora en las condiciones de ultravacío con las que opera el microscopio electrónico de transmisión.

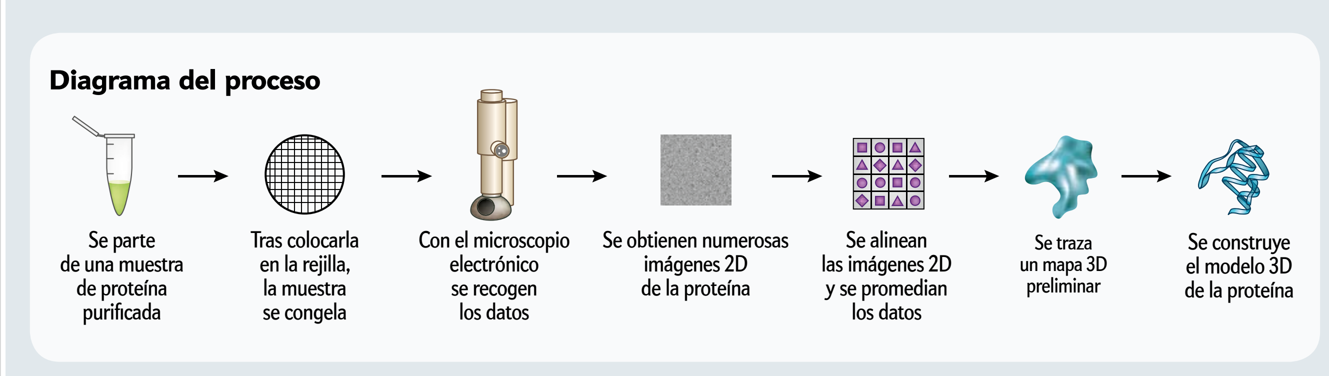
Los investigadores han explorado diversas opciones para mejorar la preparación de la muestra, como son refinar la purificación de los frágiles complejos proteicos, automatizar la preparación de las rejillas y perfeccionar las mismas. Estas mejoras, en apariencia graduales, pueden tener juntas un gran impacto en el éxito de un experimento de criomicroscopía electrónica.

De imágenes 2D al modelo 3D

El apelativo «de partículas aisladas» proviene del hecho de que las electromicrografías bidimensionales retratan partículas individuales de proteína depositadas en la rejilla. Dada la necesidad de aplicar bajas dosis de electrones para no dañar las muestras radiosensibles, las proyecciones bidimensionales contienen demasiado ruido para poder resolver las estructuras con detalle atómico. Pese a ello, las señales pueden mejorarse obteniendo el promedio de un elevado número partículas.

A menudo, estas quedan congeladas en la rejilla en orientaciones al azar, por lo que el promediado no es un proceso sencillo. Pero ello supone una ventaja, porque se necesitan muchas vistas bidimensionales distintas de la proteína para reconstruir su estructura tridimensional. Con sofisticados métodos de procesamiento, las imágenes se alinean y los datos se combinan. A continuación se traza un mapa 3D preliminar que se refina de forma iterativa y se valida con herramientas informáticas especializadas. Por último, la secuencia proteica se ajusta en el mapa 3D para construir un modelo en tres dimensiones de la proteína.

Antes eran necesarios millones de imágenes de partículas individuales para resolver una estructura con alta definición. Hoy el



cuasiatómica con los que trazar directamente modelos atómicos de estructuras totalmente nuevas.

No obstante, para hacer de la microscopía electrónica 3D una técnica de aplicación general, se necesitaban nuevos algoritmos y estrategias de reconstrucción de macromoléculas que no estuvieran organizadas en estructuras icosaédricas, helicoidales ni cristalinas. La metodología para tratar muestras compuestas por diferentes complejos macromoleculares, o partículas aisladas, que adoptan orientaciones aleatorias (o al menos múltiples) sobre la rejilla del microscopio se desarrolló en el trabajo pionero del equipo de Joachim Frank, de la Universidad de Columbia. Su esfuerzo condujo al nacimiento y la difusión de la reconstrucción de partículas aisladas, la más utilizada hoy para la dilucidación de estructuras con la criomicroscopía electrónica.

desarrollo de las cámaras de detección directa de alta sensibilidad permite resolver las estructuras con muchas menos imágenes, con el consiguiente ahorro de tiempo y de muestra, a la vez que se logran mejores resoluciones.

El despuntar de los detectores directos

En los inicios de la criomicroscopía electrónica, las imágenes bidimensionales de las partículas se obtenían en una película fotográfica. Esta proporcionaba resoluciones relativamente altas, pero su manipulación era tediosa. Muchos investigadores adoptaron entonces los dispositivos de carga acoplada (CCD) por la comodidad de la lectura digital, aunque la resolución de este tipo de cámaras era mediocre.

El desarrollo y la comercialización de los aparatos de detección directa han supuesto un avance importante para la criomicroscopía electrónica. Mientras que las cámaras CCD convierten los electrones en fotones para grabar las imágenes, los detectores directos hacen exactamente lo que su nombre indica: detectan directamente los electrones. De ese modo, las imágenes de las partículas son captadas con mucha mayor sensibilidad.

Los detectores directos también son rápidos, por lo que las imágenes pueden grabarse en «modo de vídeo». Teniendo en cuenta esta virtud, se han ideado métodos para corregir la distorsión generada durante la captación de las imágenes por los minúsculos movimientos de las muestras causados por el haz de electrones. Este novedoso modo de recolección de datos ha sido clave para obtener información con una resolución cuasiatómica.

Heterogeneidad: una bendición y una maldición

A diferencia de la cristalización, que atrapa las proteínas en su orientación más estable, las proteínas de las muestras analizadas con la criomicroscopía electrónica se mueven libremente hasta el momento de la ultracongelación. Puesto que se trata de una técnica para partículas aisladas, estas transiciones conformacionales pueden captarse y estudiarse, lo que acaba redundando en una comprensión biológica más profunda de la función y de los mecanismos de las proteínas.

El inconveniente estriba en que esa heterogeneidad conformacional dificulta, y a veces mucho, la reconstrucción 3D de alta resolución. Los algoritmos informáticos han llegado muy lejos y son capaces de clasificar conjuntos de datos heterogéneos en subconjuntos estructuralmente homogéneos, pero aún queda mucho margen de mejora.

Allison Doerr *es editora de* Nature Methods.

ANALIZAR LAS IMÁGENES

La clave de la criomicroscopía electrónica de partículas aisladas radica en las herramientas informáticas que definen las orientaciones relativas de las proyecciones bidimensionales con las que proceder a la reconstrucción en tres dimensiones. Los dos principales retos de tal empresa conciernen al carácter ruidoso de las imágenes y a la necesidad de identificar informáticamente sus orientaciones relativas. Además, con el fin de minimizar el daño por radiación de la muestra, la toma de datos se efectúa con dosis muy bajas de electrones (unos 20 a 40 electrones por angstrom cuadrado), por lo que para amplificar la señal es preciso promediar varias decenas o cientos de miles de imágenes de partículas aisladas (antes de disponer de la nueva técnica de detección, este número era del orden de millones).

Las orientaciones relativas se determinan con varios métodos. Frank y Pawel Penczek, de la Universidad de Texas, propusieron el «cotejo de proyecciones» (*projection matching*), que compara cada imagen experimental con vistas generadas por ordenador de una referencia en 3D que se asemeja a la estructura real y que asigna los ángulos según un criterio de correlación cruzada. Puede suceder que las estructuras de referencia iniciales tengan que dilucidarse *de novo* a partir de las imágenes con métodos geométricos (que recogen dos o más imágenes de la misma zona del espécimen desde diferentes ángulos de inclinación), que suelen considerarse fiables y aportan información sobre la quiralidad de la estructura. Entre estos se halla el método de reconstrucción mediante inclinación cónica aleatoria, descrito por Frank y Michael Radermacher, de la Universidad de Vermont. Como alternativa a los métodos geométricos, la orientación relativa entre las imágenes de la partícula puede determinarse analíticamente teniendo en cuenta el hecho de que cada par de proyecciones bidimensionales comparte una «línea común» en la transformada de Fourier tridimensional. El popular método de reconstitución angular propuesto por Marin van Heel, del Colegio Imperial de Londres, traslada al espacio real este principio de las líneas comunes y, aunque no necesita inclinar el espécimen, no define la quiralidad del objeto.

Las diversas metodologías de análisis de la imagen se han integrado en paquetes de *software* que los expertos utilizan con asiduidad, como Spider e Imagic. EMAN y más tarde EMAN2 fueron desarrollados por Wah Chiu y Steve Ludtke, del Colegio de Medicina Baylor, en Houston, con el fin de facilitar el procesado de las imágenes a los neófitos. Frealign, desarrollado por Nikolaus Grigorieff, del Campus de Investigación Janelia, se centra en el refinamiento tridimensional (consistente en mejorar iterativamente la densidad de referencia junto con la asignación de ángulos a las imágenes experimentales, lo cual aumenta la resolución) e incorpora una corrección muy eficaz de la función de transferencia de contraste del microscopio (el efecto del sistema óptico sobre la imagen como función de la frecuencia espacial) en el procedimiento de reconstrucción. SPARX fue creado por Penczek, Glaeser, Paul Adams, también del LNLB, y Ludtke como un entorno de programación gráfica para usuarios finales, apto tanto para la cristalografía de rayos X como para la criomicroscopía electrónica. Xmipp, desarrollado por José María Carazo, del Centro Nacional de Biotecnología del CSIC, en Madrid; Sjors Scheres, del LBM-CIM, y colaboradores,

usa una interfaz basada en X-Windows y hace hincapié en la modularidad de los protocolos de análisis de imágenes y en la descripción de la heterogeneidad estructural.

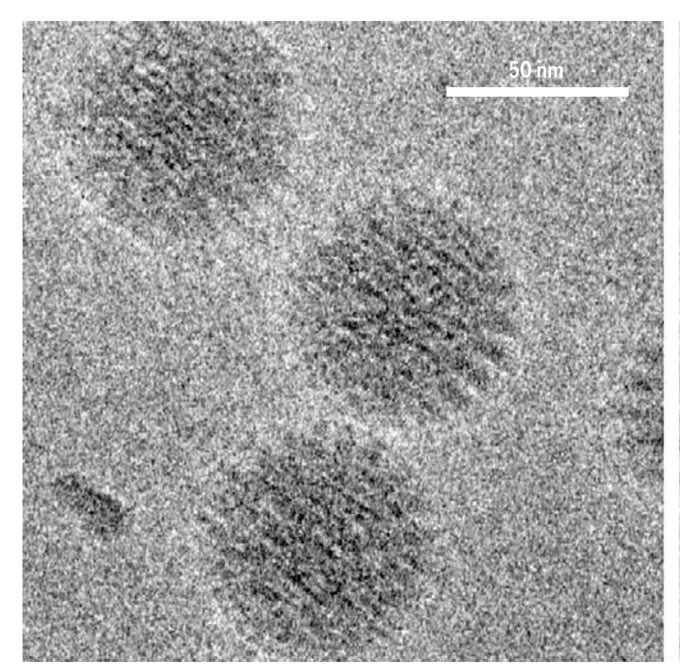
Como la criomicroscopía electrónica es una técnica para partículas aisladas, a menudo las muestras plantean el reto adicional de la heterogeneidad de composición o de conformación, una de las principales razones por las que no resulta fácil conseguir resoluciones altas. Los análisis de muestras heterogéneas requieren clasificar las imágenes de las partículas en subconjuntos estructuralmente homogéneos. Esta tarea puede llevarse a cabo usando, en primer lugar, principios geométricos y, a continuación, un método de cotejo de proyecciones con referencias múltiples. Un importante avance en el análisis de las imágenes de criomicroscopía electrónica se fraguó cuando Fred Sigworth, de la Universidad Yale, introdujo por primera vez criterios de máxima verosimilitud. El método consiste en asignar a cada imagen experimental no una única orientación relativa acorde con un cierto criterio de similitud, sino un conjunto de probabilidades de tener una orientación cualquiera. Se ha comprobado que así es posible tratar con fiabilidad las imágenes cargadas de ruido generadas por la criomicroscopía.

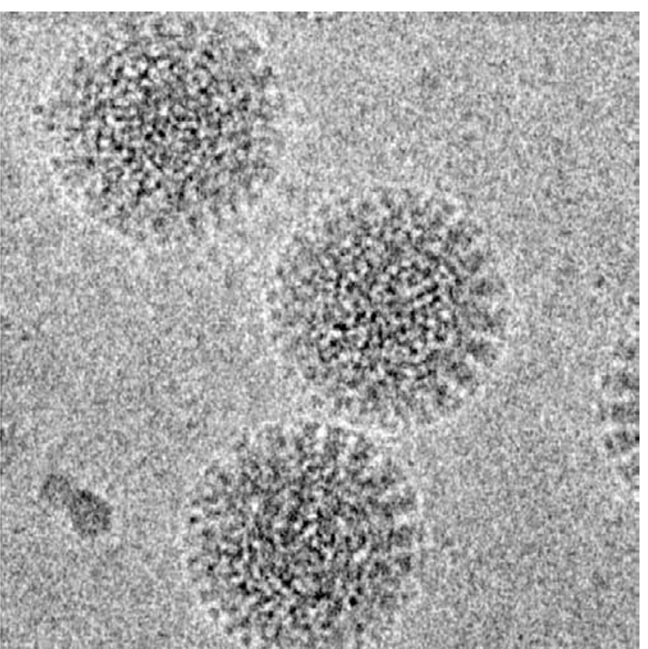
Desde entonces, para determinar de manera simultánea estados coexistentes en la muestra, se han implementado metodologías de máxima verosimilitud que clasifican sin supervisión las imágenes de las partículas. Si bien se trata de un proceso que exige una enorme potencia de cómputo, la capacidad para identificar y caracterizar múltiples estados estructurales ofrece una valiosa comprensión de la dinámica macromolecular. Hoy en día, los paquetes como Frealign y Xmipp incorporan principios de máxima verosimilitud. RELION, programa desarrollado por Scheres, ha atraído la atención mundial por su capacidad para tratar muestras heterogéneas y por su interfaz sencillo, lo que ha hecho el análisis de imágenes de partículas aisladas accesible a una comunidad de usuarios más amplia.

UNA NUEVA ERA: MÁS, MEJOR Y MÁS RÁPIDO

El campo de la microscopía electrónica 3D ha experimentado enormes progresos desde el estudio pionero de la cola del bacteriófago T4. Se han desarrollado nuevos instrumentos y métodos de procesamiento de imágenes, y la llegada de la automatización en la adquisición y análisis de los datos ha mejorado el rendimiento. En el decenio que separa la dilucidación de las primeras estructuras de virus que rompieron la barrera nanométrica y el primer trazado *de novo* de una cápside vírica, el campo de la criomicroscopía electrónica se ha consolidado, con un número creciente de laboratorios que utilizan la técnica y la incesante mejora de la resolución. Pero los avances nunca han transformado tanto el panorama como durante los últimos años, con la comercialización de las cámaras de detección directa de electrones.

La nueva técnica de detección da como resultado imágenes con un contraste notablemente mayor, lo que, sumado a la rápida velocidad de lectura, admite un «modo de vídeo» de adquisición de los datos que supera las limitaciones del movimiento inducido por el haz. Cuando los electrones atraviesan la muestra vitrificada generan el movimiento de las partículas y el hielo mientras la imagen se está captando, con lo que esta aparece borrosa. Este fenómeno se corrige dividiendo la dosis total en cortas series de fotogramas (por ejemplo, de 20, con dosis típicas de 1 electrón por angstrom cuadrado por cada fotograma) que luego se alinean y promedian, con lo que se evita que la imagen quede difuminada por el movimiento inducido por el haz; este procedimiento fue explorado por primera vez por Grigorieff. El elevado cociente entre señal y ruido de las imágenes de las partículas permite alinearlas con más precisión y, por tanto, contribuye a conseguir resoluciones más altas, potencialmente atómicas. Los avances técnicos en los detectores no solo han llevado a la determinación de estructuras tridimensionales con mayor resolución partiendo de un volumen de datos menor, sino





EL TRATAMIENTO DE LAS IMÁGENES ha mejorado la calidad de las criomicrografías, como la de estos rotavirus, obtenida con una cámara de detección directa de electrones a 40 fotogramas por segundo. A la imagen de la izquierda no se le ha aplicado ninguna alineación y aparece borrosa por efecto del movimiento generado por el haz de electrones incidente. La imagen de la derecha es el resultado de someter la anterior al alineamiento para compensar dicho movimiento, con la evidente mejora en nitidez y contraste.

FUENTE: «BEAM-INDUCED MOTION OF VITRIFIED SPECIMEN ON HOLEY CARBON FILM», POR A. F. BRILOT, J. Z. CHEN, A. CHENG, J. PAN, S. C. HARRISON, C. S. POTTER, B. CARRAGHER, R. HENDERSON Y N. GRIGORIEFF EN *J. STRUCT. BIOL.*, N.º 177, PÁGS. 630-637, 2012

LOS MICROSCOPIOS ELECTRÓNICOS como Titan Krios, uno de los más costosos del mundo, incorporan los recientes avances para dilucidar la estructura de complejos moleculares con una resolución muy elevada.



que, además, ahora es posible visualizar muestras en estado hidratado y congelado de menor tamaño, de modo que se pueden estudiar complejos pequeños o proteínas individuales. Tal vez sea más significativo el hecho de que también mejora la clasificación de las muestras heterogéneas, lo cual ha conducido al descubrimiento y la descripción de estados inusuales.

Así pues, como resultado de las mejoras en el equipo físico y en las herramientas informáticas, la aplicabilidad, la resolución y el rendimiento de la criomicroscopía electrónica de partículas aisladas se han incrementado de manera espectacular, lo que la convierte en una excelente alternativa a la cristalografía de rayos X. Como consecuencia de ello, está provocando una avalancha de nuevos conocimientos sobre sistemas biológicos que antes se resistían a la caracterización estructural. Entre ellos se cuenta un número cada vez mayor de proteínas integrales de membrana; polímeros biológicos, como la actina F y los microtúbulos; grandes ensamblajes que solo se producen en cantidades ínfimas, como los complejos de iniciación de la transcripción; y estados inusuales dentro de mezclas bioquímicas complejas, como los que se observan en los complejos de iniciación de la traducción eucariota.

REFLEXIONES FINALES

La criomicroscopía electrónica ha alcanzado tal nivel de madurez que ciertos tipos de muestras, como virus o ribosomas, ya muy pocas veces se caracterizan mediante cristalografía de rayos X. Una tendencia similar comienza a entreverse en el caso de las proteínas integrales de membrana. A medida que disminuya el tamaño necesario de las moléculas para poder ser analizadas, el número de sistemas susceptibles de estudio con la criomicroscopía electrónica crecerá y esta se apropiará de un dominio experimental que antes pertenecía a los rayos X. Pero, para esta autora, el aliciente se halla más en lo «grande» que en lo «pequeño». Los complejos macromoleculares de gran tamaño, en especial cuando la reconstitución se vuelve limitante y las fuentes endógenas son escasas, han representado durante un tiempo el dominio de la criomicroscopía electrónica. Estos ensamblajes tienden a ser flexibles y, aunque los métodos de clasificación han llegado muy lejos en mezclas bioquímicas o estados conformacionales bien definidos, el movimiento continuo que caracteriza ciertas muestras planteará un reto para los esquemas clasificatorios e impondrá un límite a la resolución alcanzable, al menos durante varios años. Aun así, tales estudios conseguirán resoluciones subnanométricas a la vez que describirán estados múltiples (o incluso trayectorias conformacionales). En tales casos, el conocimiento de las estructuras obtenido con la criomicroscopía será muy valioso, pero lo será aún más si pueden incorporarse estructuras cristalinas de componentes obtenidas por rayos X usando metodologías híbridas para generar modelos pseudoatómicos. En este contexto, los métodos informáticos que predicen las interacciones o estructuras proteicas también desempeñarán un papel clave de aquí en adelante.

Importantes cuestiones técnicas y nuevas oportunidades aguardan al campo de la criomicroscopía electrónica. Se están desarrollando la tecnología de placa de fases, detectores aún mejores, procedimientos perfeccionados y reproducibles para la preparación de las muestras y nuevos programas informáticos capaces de tratar formas continuas de variabilidad estructural, lo que propiciará mayores avances en un futuro cercano. Entre los retos inmediatos se halla el elevado coste de adquisición y mantenimiento de los equipos de microscopía electrónica y la enorme potencia de cómputo necesaria, un hecho que invita a pensar en un nuevo modelo de financiación en el que se compartan instrumentos y recursos de supercomputación. Por último, en el campo en auge de la criomicroscopía electrónica existe una clara necesidad de herramientas sencillas para validar estructuras que estén al alcance de toda la comunidad científica. IyC

La autora agradece a R. Glaeser sus comentarios durante la preparación del artículo y declara recibir financiación del Instituto Nacional de Ciencias Médicas Generales de los EE.UU.

Artículo original publicado en *Nature Methods*, vol. 13, n.º 1, págs. 23-27, 2016.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2016

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Reconstruction of three dimensional structures from electron micrographs. D. J. De Rosier y A. Klug en *Nature*, vol. 217, págs. 130-134, 1968.
Three-dimensional reconstruction from a single-exposure, random conical tilt series applied to the 50S ribosomal subunit of *Escherichia coli*. M. Radermacher et al. en *Journal of Microscopy*, vol. 146, págs. 113-136, 1987.
Model for the structure of bacteriorhodopsin based on high-resolution electron cryo-microscopy. R. Henderson et al. *Journal of Molecular Biology*, vol. 213, págs. 899-929, 1990.
Three-dimensional electron microscopy of macromolecular assemblies. J. Frank. Academic Press, San Diego, 1996.
Structure of the alpha beta tubulin dimer by electron crystallography. E. Nogales, S. G. Wolf Y K. H. Downing en *Nature*, vol. 391, págs. 199-203, 1998.
A maximum-likelihood approach to single-particle image refinement. F. J. Sigworth en *Journal of Structural Biology*, vol. 122, págs. 328-339, 1998.
Molecular architecture of a eukaryotic translational initiation complex. I. S. Fernández et al. en *Science*, vol. 342, DOI: 10.1126/science.1240585, 2013.
Glycine receptor mechanism elucidated by electron cryo-microscopy. J. Du et al. en *Nature*, vol. 526, págs. 224-229, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

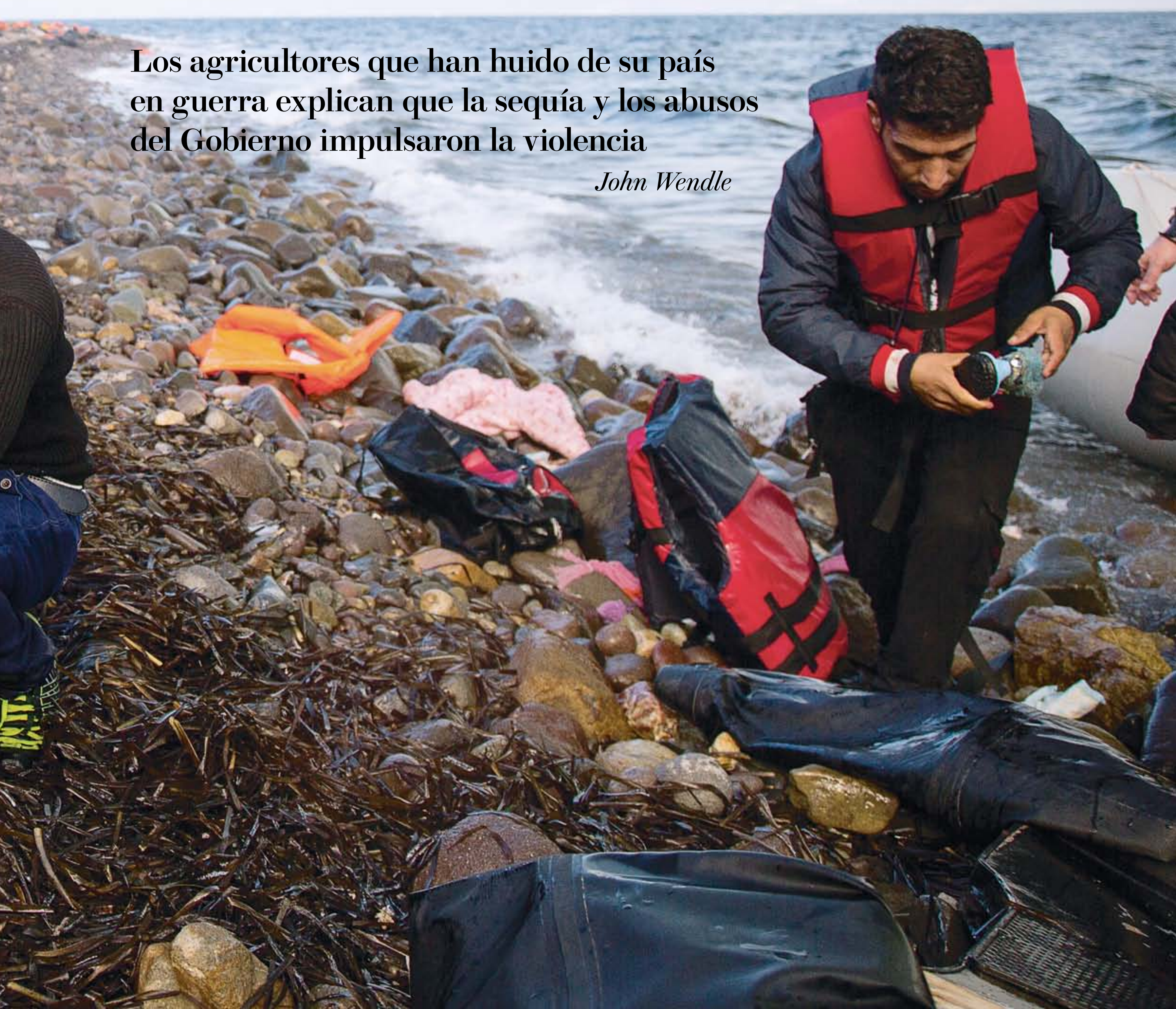
Microscopios de rayos X. Malcolm R. Howells, Janos Kirz y David Sayre en *IyC*, abril de 1991.

CORTESÍA DEL INSTITUTO NACIONAL DE ALERGIA Y ENFERMEDADES INFECCIOSAS DE EE.UU.



UN SIRIO consuela a su mujer tras recorrer en un bote abarrotado el peligroso trayecto de 16 kilómetros que separa Turquía de Grecia, una vía de escape para muchos de los que abandonan una Siria desolada por la guerra.

Los refugiados sirios, víctimas del cambio climático



Los agricultores que han huido de su país en guerra explican que la sequía y los abusos del Gobierno impulsaron la violencia

John Wendle


John Wendle es escritor, fotógrafo y autor de vídeos. Ha cubierto revueltas en la antigua Unión Soviética y en Afganistán desde 2005 y actualmente analiza el conflicto entre el hombre y el medioambiente. Puede hallarse más información sobre su trabajo en: johnwendle.com

KEMAL ALI había dirigido durante 30 años una próspera empresa de excavación de pozos agrícolas en el norte de Siria. Disponía de todo lo necesario para su negocio: pesado utillaje para introducir los tubos en el subsuelo, un camión maltrecho pero fiable para transportar la maquinaria y una dispuesta plantilla de jóvenes empleados para el trabajo duro. Además, sabía bien dónde perforar y disfrutaba de contactos de confianza en el Gobierno local que miraban hacia otro lado si se saltaba alguna norma. Pero la situación dio un vuelco cuando, en el invierno de 2006-2007, el nivel freático comenzó un descenso sin precedentes.

Ali tenía un problema. «Antes de la sequía solía perforar hasta entre 60 y 70 metros para encontrar agua», recuerda. «A partir de entonces tuve que hacerlo hasta los 100 y los 200 metros. Después, cuando la sequía se intensificó, me vi obligado a llegar a los 500. La máxima profundidad que he alcanzado ha sido 700 metros. El agua descendía cada vez más.» Desde aquel invierno hasta 2010, Siria padeció la sequía más devastadora de su historia. Ali se quedó sin negocio. Trató de buscar trabajo, pero no lo encontró. Las revueltas sociales en el país fueron creciendo y casi pierde la vida en un fuego cruzado. Ahora pasa sus días en una silla de ruedas en un campamento para refugiados heridos y enfermos de la isla griega de Lesbos.



Según los climatólogos, Siria representa el triste preludio de lo que le aguarda a buena parte de Oriente Próximo, el Mediterráneo y otras regiones del planeta. Sostienen que la sequía se agravó como consecuencia del cambio climático. El Creciente Fértil —la cuna de la agricultura hace 12.000 años— se está secando. La sequía de Siria ha causado la destrucción de cosechas, la pérdida de ganado y el desplazamiento de hasta un millón y medio de campesinos sirios. De acuerdo con un artículo publicado en marzo de 2015 en la revista científica estadounidense *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* (*PNAS*), las repercusiones de la sequía encendieron un clima de crispación social que desembocó en una guerra civil. La docena de antiguos empresarios, como Ali, con los que he hablado recientemente en campos de refugiados sirios corroboran que eso es exactamente lo que ocurrió.

Pikpa, el campo en el que conocí a Ali el pasado noviembre, suponía la puerta de acceso a Europa para los solicitantes de asilo que habían sobrevivido al peligroso viaje en bote desde Turquía. Su familia y él, junto con miles de otros fugitivos del devastado campo sirio, representan una situación que amenaza con convertirse en una multitud mundial de refugiados de países donde un Gobierno inestable y represor se hunde bajo el peso de una mezcla tóxica de cambio climático, prácticas agrícolas insostenibles y mala gestión de los recursos hídricos.

EN SÍNTESIS

La sequía, agravada por el cambio climático y las malas políticas gubernamentales, ha forzado a más de un millón de sirios a abandonar sus tierras para mudarse a ciudades superpobladas. Según sus testimonios, las restricciones de agua, la degradación del suelo y la corrupción dispararon la revolución.

Debido a la falta de trabajo y la subsiguiente violencia, un gran número de sirios ha huido a Turquía para cruzar el mar desde allí y llegar a Grecia. Cientos de adultos y niños han muerto ahogados por el camino.

Según los climatólogos, las sequías serán cada vez más frecuentes y severas, una tendencia que podría extenderse por Oriente Medio y la región mediterránea.

FOTOGRAFÍAS DE JOHN WENDLE



UNA OLEADA de refugiados sirios ha alcanzado en los últimos meses la isla griega de Lesbos (*página opuesta*). Allí, Kemal Ali, de 54 años, descansa en el campo de refugiados de Pikpa (*izquierda*). Excavaba pozos para granjeros hasta que, como consecuencia de la sequía, el agua subterránea descendió hasta niveles demasiado profundos. Posteriormente perdió la movilidad de las piernas cuando, en Siria, un fuego cruzado alcanzó el autobús en que viajaba.

CUARENTA AÑOS DE FURIA

La crisis del agua en Siria ha sido en muy buena medida responsabilidad del propio país. En la década de los setenta, el régimen militar dirigido por el presidente Hafez al-Assad lanzó una campaña mal planteada en favor de la autosuficiencia agrícola. Nadie pareció preguntarse primero si Siria contaba con el agua subterránea y las precipitaciones suficientes para que prosperaran los cultivos. Los agricultores compensaron la carencia de agua excavando pozos para extraerla de los acuíferos del país. Cuando los niveles freáticos descendieron, perforaron a mayor profundidad. En 2005, el régimen del presidente Bashar al-Assad, hijo y sucesor de Hafez al-Assad, ilegalizó la construcción de nuevos pozos por quienes no poseyesen una licencia concedida personalmente por un funcionario a cambio de una tasa, una medida en gran parte ignorada debido a la necesidad. «Lo que está ocurriendo en todo el mundo, y en particular en Oriente Medio, es que el agua subterránea está desapareciendo a velocidades alarmantes», afirma Colin Kelley, de la Universidad de California en Santa Bárbara, primer autor del artículo publicado en *PNAS*. «Es como si estuviéramos conduciendo lo más rápido posible hacia el borde de un precipicio.»

Siria se ha tirado de cabeza a él. «La guerra y la sequía son lo mismo», sostiene Mustafa Abdul Hamid, un agricultor de 30 años de Azaz, población cercana a Alepo, que charla conmigo en Kara Tepe, el principal campo de refugiados sirios en Lesbos. Es una tarde calurosa. Cerca de una llave de agua, un olivo está cubierto de ropa de bebé puesta a secar. Dos niños corretean entre las filas de tiendas y refugios temporales mientras juegan a la guerra con palos a modo de pistolas. «El comienzo de la revolución estuvo en el agua y en la tierra», comenta Hamid.

Recuerda que antes de la sequía se vivía bien. En Siria, cultivaba con su familia tres hectáreas de tierra tan fértiles que eran del color de la jena. Sembraban trigo, habas, tomates y patatas. Hamid recuerda que durante los años anteriores a la sequía cosechaba tres cuartos de tonelada de trigo por hectárea. Pero entonces dejó de llover y sus cosechas se redujeron casi a la mitad. «Lo único que necesitaba era agua», señala. «Y no la tenía, así que la situación empeoró. El Gobierno no nos permitía perforar en busca de agua. Podías ir a la cárcel».

Durante un tiempo, Ali fue más afortunado que Hamid: tenía contactos. Con tal de que dispusiera de una bolsa llena de dinero podía seguir perforando sin que nadie le interrumpiera. «Si les llevas el dinero consigues rápidamente los permisos que necesitas», explica. «Si no, debes esperar entre tres y cinco meses. Hay que tener amigos.» Consigue forzar una sonrisa, empañada por la situación en que se encuentra. Su historia pone de manifiesto otra prolongada injusticia que ha contribuido a la crisis en Siria: la ubicua corrupción oficial.

Los sirios estaban habituados a ver los robos de los funcionarios como parte inevitable de la vida. Tras más de cuatro décadas bajo los dos regímenes totalitarios de la familia Assad, la población se resignó a hacer frente a toda clase de penalidades. Sin embargo, se estaba acumulando una masa crítica. En los últimos años, los refugiados de guerra iraquíes y los campesinos sirios desplazados han inundado las ciudades de Siria. La población urbana del país se expandió desde 8,9 millones en 2002, justo antes de la invasión de Irak por EE.UU., hasta 13,8 millones en 2010, en la etapa final de la sequía. El artículo publicado en *PNAS* resume así las implicaciones del fenómeno para el país: «Las cada vez mayores periferias urbanas de Siria, caracterizadas por los asentamientos ilegales, la superpoblación, la pobreza de las infraestructuras, el desempleo y la criminalidad, fueron ignoradas por el Gobierno de Assad y se convirtieron en el factor central de las revueltas».



UN GRAN NÚMERO de refugiados sirios cruzan la frontera de Turquía y viajan hasta la costa oeste, donde se suben a botes abarrotados con destino a Lesbos (*mapa*). Durante su estancia en el campamento de tránsito Kara Tepe, los refugiados rezan, esperan y tratan de mantener el calor mientras llega el momento de ir a Mitilene, el principal puerto y capital de Lesbos (*fotografías*). Una vez allí podrán comprar los billetes del ferry que los llevará hasta Atenas para continuar su viaje por Europa continental.

Hacia 2011 la crisis del agua había llevado al límite las frustraciones de la población. «Los agricultores pudieron sobrevivir un año, quizá dos, pero a los tres años sus recursos se agotaron», señala Richard Seager, uno de los coautores del artículo de *PNAS* y profesor del Observatorio de la Tierra Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia. «No tuvieron más remedio que abandonar sus tierras.»

Hamid se muestra de acuerdo: «La sequía duró años y nadie decía nada en contra del Gobierno. En 2011 nos hartamos. Y estalló la revolución». Aquel febrero los levantamientos de la Primavera Árabe barrieron Oriente Medio. En Siria las protestas se intensificaron, la represión se endureció y estallaron en el país 40 años de furia reprimida.

SIN AGRICULTURA Y SIN FUTURO

Este año Hamid ha tenido que abandonar sus tierras. La violencia lo superaba. «Me fui de Siria por la guerra y porque no había trabajo», afirma.

Ali también trató de aguantar, pero solo unos pocos de sus exclientes podían permitirse perforar hasta la profundidad donde se hallaba el agua. Por otro lado, la guerra prácticamente imposibilitaba las actividades cotidianas. Su pueblo natal se hallaba muy cerca de la destruida Kobane, en la frontera turca. La ciudad estaba en ruinas cuando los kurdos lograron recuperarla de las manos del Estado Islámico (ISIS), el grupo extremista que ha tenido aterrorizada a la región. El pasado julio Ali se desplazó a Damasco con la esperanza de encontrar trabajo y un lugar donde su familia pudiera estar a salvo. Se dirigía hacia allá cuando de pronto un cohete dio contra su autobús. Se despertó hospitalizado en Damasco, paralítico de cintura para abajo. La explosión había dejado su columna vertebral salpicada de metralla. Su familia se las apañó para llevarlo de nuevo al norte, y juntos atravesaron Turquía hasta alcanzar el Egeo.

Cada día llegan a esas costas turcas extranjeros desesperados, de todas las edades y procedentes no solo de Siria, sino de todo Oriente Próximo. Se hacinan a bordo de grandes botes y cruzan los casi 16 kilómetros que hay entre la orilla turca y la isla de Lesbos. Las embarcaciones suelen estar sobrecargadas y en mares agitados pueden volcar con facilidad. La mayoría no sabe nadar y el 20 por ciento son niños. Continuamente mueren personas ahogadas.

Muchos llegan con vida a la isla de Lesbos y continúan su camino lo más rápido posible. En las playas del norte de la isla, los primeros rayos de sol iluminan los chalecos salvavidas abandonados y los botes rotos que se extienden hasta donde alcanza la vista. Según la Organización Internacional para las Migraciones, solo en noviembre del año pasado entraron en Grecia más de 100.000 emigrantes extranjeros (nada menos que 776.376 llegaron a Grecia en 2015 hasta principios de diciembre). Un punto naranja que sube y baja en el horizonte anuncia la llegada inminente de otro bote desde Turquía. Al aproximarse a la costa, un hombre se levanta entre los pasajeros apiñados y alza triunfante los brazos haciendo el símbolo de la victoria con ambas manos.

El damasquino Louy al-Sharani, de 25 años, camina salpicando agua hasta alcanzar la orilla acompañado de su hermano mayor. Ambos se apresuran a continuar su camino, cargando con sus bolsas por la pronunciada pendiente de la carretera costera: quieren llegar a Noruega lo antes posible. Su hermano tiene prisa por encontrar un trabajo para que su mujer pueda unirse a él antes del verano, para cuando esperan su primer hijo. Al-Sharani dice estar impaciente por empezar su segundo máster. «He nacido para utilizar mi mente», afirma. «No he nacido para sujetar una metralleta y disparar a la gente.»







Su madre vendió las joyas, incluido el anillo de casada, y así pudo darles 6000 dólares para el viaje. Según al-Sharani, ya se han gastado 2400 en llegar hasta donde están. De todos modos, ¿qué otras opciones tenían? Antes de la guerra, Al-Sharani había completado un máster en economía agraria, pero ahora no ve ningún futuro para él ni para la gente de campo del país. Por si la prolongada sequía no fuera suficiente, el ISIS ha hecho que las perspectivas de la nación sean todavía menos halagüeñas. Al-Sharani explica que las facciones beligerantes están ahora robando reservas de trigo, es decir, utilizando la comida como arma para controlar a la población. «Hoy un agricultor no puede encontrar agua para regar ni ayuda alguna del Gobierno, y sufre la presión, bien de los rebeldes, bien del ejército sirio. Hay un millón de maneras de morir en Siria, y no puedes imaginarte lo horribles que son», asegura. «Después de 10 años, lo que veo es, desgraciadamente, un nuevo Afganistán.»

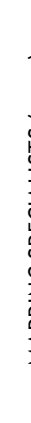
UN CRECIENTE (IN)FÉRTIL

Richard Seager no es tan pesimista. Da por cierto que la crisis de los refugiados terminará mitigándose y que la guerra de Siria llegará a su fin. No obstante, señala que la frecuencia y la severidad de las sequías aumentarán gradualmente en un futuro previsible. Tras haber analizado con detalle decenas de modelos climáticos, Seager, Kelley y sus colaboradores aseveran que las continuas emisiones de gases con efecto invernadero causarán el ensanchamiento de la célula de Hadley, el cinturón de aire que envuelve los trópicos, lo que derivará en una mayor desecación de las tierras del Mediterráneo oriental.

Según Seager, el Creciente Fértil podría perder su forma actual y dejar de existir por completo a finales de siglo como consecuencia de una gran reducción del caudal de los ríos Éufrates y Jordán. «No se producen muchas precipitaciones en la región, así que cualquier cambio supone una diferencia notable», advierte. «El Mediterráneo presenta unas características específicas que lo están haciendo altamente sensible desde el punto de vista hidrológico al aumento de los gases con efecto invernadero».

Una vez fuera de su país, la familia de Ali está tratando de que llegue a Alemania, donde esperan que los cirujanos consigan que recupere la capacidad de caminar. Sentado al aire libre en su silla de ruedas para disfrutar de unos minutos de sol, Ali piensa en los amigos que dejó en Siria. «La vida del campesino siempre ha sido dura», comenta. «Su mayor problema era el agua. Punto. Porque el agua es vida.»

Su hijo lo lleva adentro para que descanse. La débil luz del invierno ilumina a medias una gran sala donde se alinean unas decenas de camas. Sacos de plástico y bolsas baratas de viaje se amontonan por todos lados; en ellas sus dueños guardan las pocas posesiones que les quedan. Cuando sus hijos lo levantan para tumbarlo en la cama, hace un gesto de dolor y agotamiento. Fardous, la hija de 19 años, le aprieta la bolsa de colostomía contra el cuerpo y lo arropa con mantas donadas. «Está escrito en el Corán», repite Ali. «El agua es vida.» IyC



PARA SABER MÁS

First super-high-resolution model projection that the ancient «Fertile Crescent» will disappear in this century. Akio Kitoh et al. en *Hydrological Research Letters*, vol. 2, págs. 1-4, 2008.

Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought. Colin P. Kelley et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 112, n.º 11, págs. 3241-3246, 17 de marzo de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

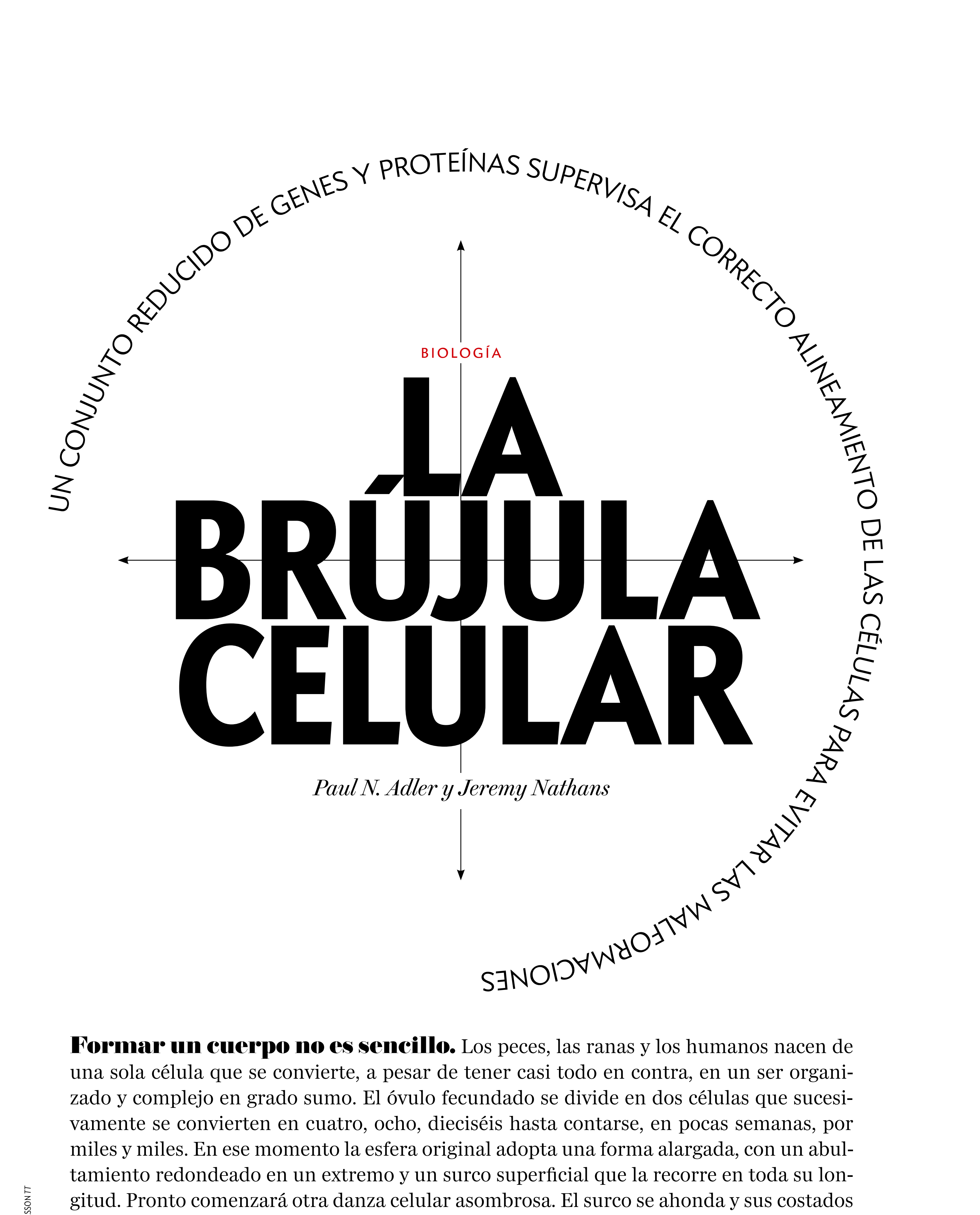
Víctimas del cambio climático. Alex de Sherbinin, Koko Warner y Charles Ehrhart en *IyC*, marzo de 2011.



El desarrollo inicial del embrión humano depende en parte de la polaridad de las células recién formadas. Las electromicrografías muestran una sección transversal de un espermatozoide todavía en el testículo (*1*) y a su lado el óvulo, mucho más voluminoso (*2*). Veintidós días después de la fecundación, las células de la cresta neural (*amarillo, 3*) aún no se han unido para formar el tubo que dará lugar al cerebro y a la espina dorsal, ya claramente visibles a las seis semanas (*4*).

BIOLOGÍA

LA BRÚJULA CELULAR



Paul N. Adler y Jeremy Nathans

Formar un cuerpo no es sencillo. Los peces, las ranas y los humanos nacen de una sola célula que se convierte, a pesar de tener casi todo en contra, en un ser organizado y complejo en grado sumo. El óvulo fecundado se divide en dos células que sucesivamente se convierten en cuatro, ocho, dieciséis hasta contarse, en pocas semanas, por miles y miles. En ese momento la esfera original adopta una forma alargada, con un abultamiento redondeado en un extremo y un surco superficial que la recorre en toda su longitud. Pronto comenzará otra danza celular asombrosa. El surco se ahonda y sus costados se cierran sobre sí mismos hasta formar un tubo largo y hueco que dará lugar al cerebro en el extremo abultado y a la médula espinal en el otro.

LENNART NILSSON TT

Para lograr semejante precisión, estas y otras células del embrión deben conocer su ubicación en relación con el resto del organismo. Cada célula necesita saber dónde están la parte frontal, posterior, superior e inferior del animal. También debe calcular a qué distancia se halla de cada uno de esos puntos del cuerpo. Nosotros y otros expertos en biología del desarrollo hemos dedicado las últimas décadas a descifrar los entresijos de este sistema de orientación celular. Como parte de esta gran búsqueda, hemos descubierto un componente clave constituido por ciertas proteínas que actúan conjuntamente como una brújula minúscula en el interior de cada célula. Sin ella, el corazón, los pulmones, la piel y demás órganos no se desarrollarían correctamente. Cuando una de esas proteínas queda alterada por una mutación, el feto sufre graves defectos congénitos.

Aún queda un largo camino, pero lo descubierto hasta ahora sobre el funcionamiento de este sistema de orientación esclarece algunos de los procesos básicos del desarrollo animal. Sabemos mucho acerca de la brújula de las células epiteliales, que tapizan los tejidos con una fina capa de una célula de grosor, como las baldosas del suelo. A modo de comparación, si la sábana de una cama estuviese compuesta de células epiteliales, las proteínas identificadas permitirían a cualquier célula de la tela percibir cuál de sus lados está más cerca del cabecero o del pie.

Aquellos organismos cuyas células conocen su ubicación en el cuerpo gozan de una indiscutible ventaja evolutiva: los tejidos complejos ya no precisan ser simétricos en todas direcciones y eso abre la puerta a la especialización de las diversas partes. Por ejemplo, los cilios situados en uno de los extremos del conducto coclear del oído perciben los sonidos agudos, mientras que los radicados en el extremo opuesto detectan los graves. Los científicos definen la asimetría resultante de la capa de tejido como polaridad planar, porque los polos opuestos se pueden ver a través del plano de los tejidos.

Cada vez que los animales inventan una herramienta que funciona, la conservan. A semejanza de los genes que codifican las proteínas reguladoras, los que codifican las proteínas de la polaridad planar han cambiado muy poco a lo largo de la escala evolutiva. Sin ir más lejos, las versiones propias de los mamíferos y de los insectos son muy similares. Tampoco sorprende que tales genes sean ancestrales y que su génesis se remonte a hace más de 500 millones de años, en plena diversificación del reino animal.

LOS INSECTOS MUESTRAN EL CAMINO

Casi todo lo que sabemos acerca de la polaridad planar procede de estudios con insectos iniciados a mediados del siglo xx. Por conveniencia tales experimentos se centraron en la cutícula, la capa externa que protege a los individuos adultos, más accesible que los órganos internos. La cutícula es segregada por una capa de células de la epidermis cutánea que se halla justo por debajo de ella.

Vista a través de la lente del microscopio, la superficie externa de la cutícula revela un paisaje ordenado de crestas y escamas jalonadas a intervalos regulares por pelos y cerdas. Algunas de esas protuberancias son sensibles a los cambios de presión o de concentración de sustancias químicas en el entorno. Casi todos los pelos o cerdas se alinean en paralelo con sus vecinos cercanos, de modo que apuntan en la misma dirección. Mientras que los pelos de las alas apuntan hacia afuera, los radicados en el cuerpo lo hacen en sentido contrario a la cabeza. Como en las paredes del tubo neural recién formado, estas células parecen saber dónde se halla la parte anterior y posterior del insecto, así como si se sitúan cerca o lejos de otros tejidos (proximales o distales a ellos).

Las células parecen compartir esa información direccional, como ya demostraron hace más de cuarenta años Peter Lawrence, de la Universidad de Cambridge, y el ya fallecido Michael Locke, de la Universidad de Ontario Occidental, entre otros. En una serie de experimentos pioneros cortaron cuidadosamente minúsculos recuadros de la epidermis secretora del exoesqueleto de vinchucas (*Rhodnius*) y chinches (*Oncopeltus*). Después, los giraron 180 grados y los reimplantaron en el abdomen de otros insectos.

Uno esperaría que las crestas y las cerdas de la cutícula formadas tras el giro de 180 grados señalarían en sentido contrario al de las crestas y cerdas circundantes. Pero tras la muda, desprendido el viejo exoesqueleto y renovado el nuevo, surgió la sorpresa. En lugar de permanecer alineadas en direcciones opuestas, las cerdas y crestas situadas en los márgenes del recuadro trasplantado trazaban hermosos remolinos. La disposición del remolino indicaba que las células vecinas habían reajustado su orientación para reducir al mínimo las diferencias entre ellas. Era obvio que las células eran capaces de indicar a las otras la dirección en que debían señalar las crestas y las cerdas. ¿Pero cómo?

Revelar la maquinaria celular y molecular requirió un cambio de táctica y pasar de las manipulaciones quirúrgicas al estudio genético. Y cuando hablamos de genética, el insecto modelo por antonomasia es la mosca de la fruta (*Drosophila melanogaster*), que viene siendo estudiada desde 1910.

A partir de la década de los ochenta, algunos investigadores, entre ellos uno de los autores (Adler), comenzaron a investigar la polaridad de los tejidos en la mosca de la fruta. El método consistió en descubrir y estudiar individuos mutantes que presentaban defectos en el sistema de polaridad con el fin de deducir su funcionamiento en condiciones normales. Sabíamos,



Paul N. Adler es profesor de biología en la Universidad de Virginia.

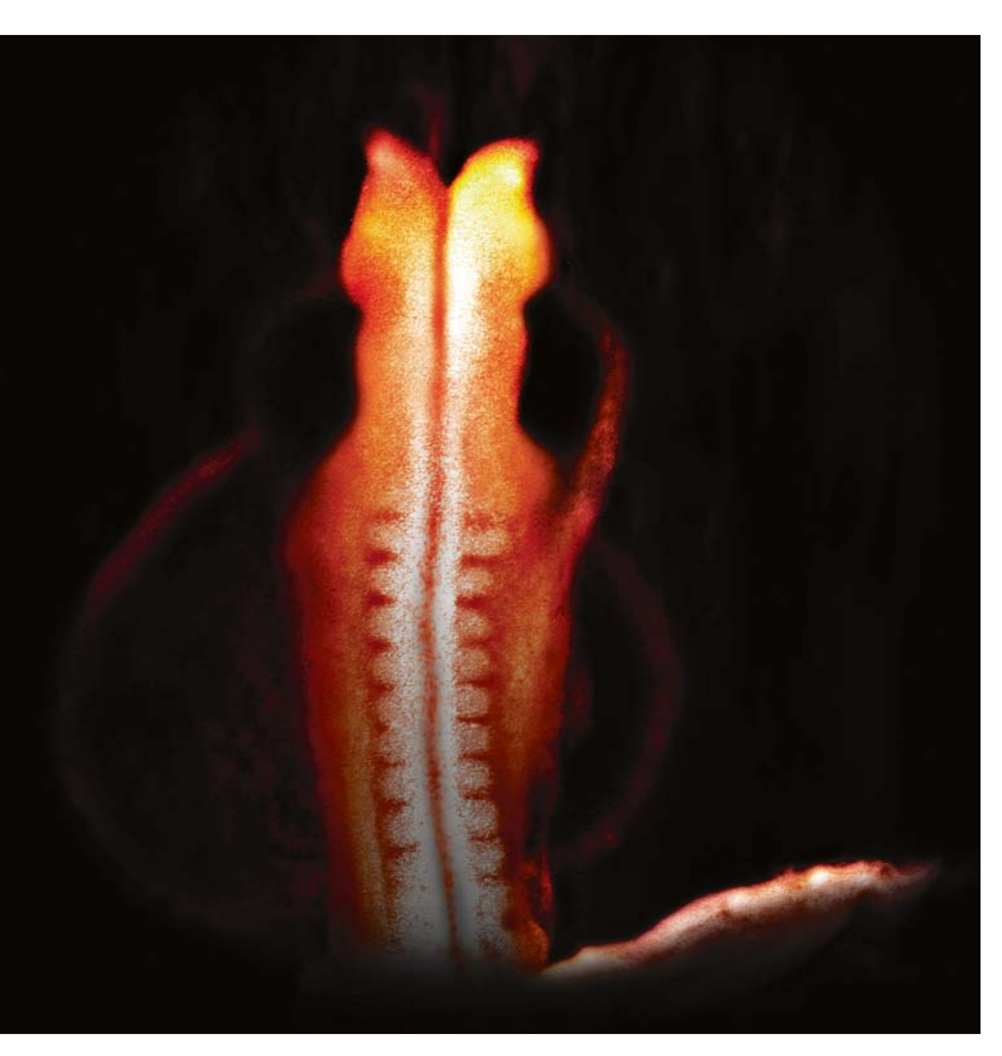
Jeremy Nathans es profesor de biología molecular y genética, neurología y oftalmología en la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins y es investigador en el Instituto Médico Howard Hughes.

EN SÍNTESIS

Todas las células animales necesitan saber dónde están con respecto al resto del cuerpo.

En las últimas décadas la ciencia ha descubierto algunas proteínas clave que permiten a las células conocer la ubicación de la parte frontal, posterior o de la cabeza de un animal, entre otros puntos.

Estas proteínas son tan importantes que los genes que las codifican no han cambiado gran cosa desde su aparición hace más de 500 millones de años.



EMBRIÓN HUMANO: Una imagen creada con ordenador revela los pliegues neurales a los 22 días de desarrollo. Los botones situados a ambos lados engendrarán la musculatura estriada y el esqueleto.



por ejemplo, que los pelos de las alas de *Drosophila,* a semejanza de los del abdomen de la vinchuca y la chinche, apuntaban en una misma dirección, en este caso hacia el borde más alejado. Sin embargo, ciertas mutaciones en un gen llamado *frizzled* conferían a la mosca un aspecto de «recién levantada», con multitud de pelos orientados en todas direcciones. Otros cambios en un segundo gen, *dishevelled* (despeinado), causaban un efecto similar, tal y como su nombre indica. Esta semejanza era un indicio de que ambos forman parte de un sistema que controla la orientación celular.

Dos grupos, uno encabezado por David Gubb y Antonio García-Bellido, ambos entonces en la Universidad Autónoma de Madrid, y otro por Adler, estudiaron sistemáticamente de qué modo *frizzled, dishevelled* y otras mutaciones afectaban a la orientación de varias partes de la cutícula de la mosca de la fruta. Finalmente se descubrió que el sistema de polaridad de *Drosophila* constaba de seis genes y proteínas primordiales. Dos de ellos, que Adler aisló en 1998, actúan como *frizzled.* Las mutaciones en cualquiera de ambos generan una serie de remolinos que a su descubridor le evocaron las pinceladas en las pinturas de Vincent van Gogh. Por ello nombró a uno *Van Gogh* y al otro *starry night* [por *La noche estrellada*, célebre obra del pintor].

Otro paso decisivo en la comprensión de las bases celulares de la polaridad planar en *Drosophila* llegó pocos años después, cuando Lily Wong, entonces estudiante del laboratorio de Adler, examinó la formación de los pelos en las alas incipientes para averiguar de qué modo las mutaciones en los genes de la polaridad tisular alteraban el proceso. Wong descubrió que cada célula epitelial formaba un pelo en su borde más distal y que las mutaciones que alteraban la polaridad modificaban el sitio de formación del pelo. Ello llevó a Wong y Adler a formular la hipótesis de que las proteínas de la polaridad forman parte de una vía de señalización que regula la arquitectura del citoesqueleto, la malla de proteínas polimerizadas que controla la forma y el movimiento de la célula.

Charles R. Vinson, entonces también estudiante del laboratorio de Adler, demostró la propagación local de las señales de una célula a otra con la creación de pequeños grupos de células mutantes *frizzled* en alas por lo demás normales. Las células mutadas hicieron que las células vecinas normales reorientaran sus pelos aproximadamente 180 grados, de modo que los pelos apuntaran de nuevo hacia las mutantes. La orientación de las células no mutadas que estaban alejadas del grupo de mutantes no sufrió cambios. Vinson y Adler dedujeron que el sistema de polaridad controla la orientación celular a través de señales de corto alcance y que no es necesario mandar señales a larga distancia, como podría ocurrir con un gradiente químico, para determinar la orientación apropiada.

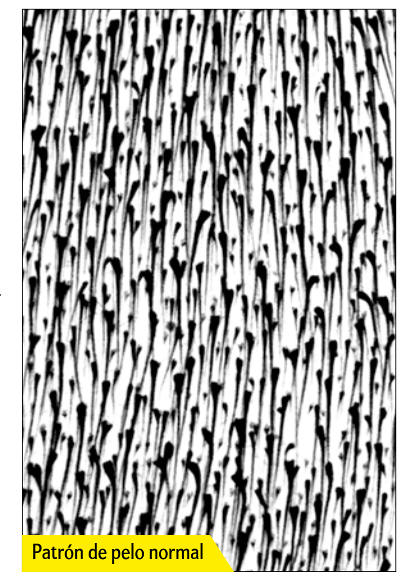
UN MODELO ATRACTIVO

La idea de que las proteínas de la polaridad pudieran regular la formación del citoesqueleto incitó a varios investigadores a intentar averiguar en qué puntos de la célula se distribuyen. Puesto que no están repartidas uniformemente, ejercen efectos distintos a lo largo y ancho de la célula. Hasta el año 2005, Tadashi Uemura, de la Universidad de Kioto, Jeffrey Axelrod, de la Universidad Stanford, Marek Mlodzik, de la Escuela de Medicina Icahn del Hospital Monte Sinaí, y David y Helen Strutt, de la Universidad de Sheffield, habían descubierto una serie de patrones llamativos. Por ejemplo, en la monocapa celular que forma la superficie del ala de la mosca de la fruta, las proteínas Van Gogh se acumulan mayoritariamente en el lado de la célula más cercano al cuerpo. En cambio, las proteínas frizzled se acumulan preferentemente en el lado más próximo al extremo del ala. Las proteínas starry night se hallan en ambos lados.

Esa asimetría inspiró un modelo que pretende describir el funcionamiento del sistema direccional. Este postula dos tipos de interacciones entre las proteínas Van Gogh y frizzled: uno en

Organizadores de los tejidos

Los peces, las aves y los mamíferos comparten una característica especial en lo que a su piel se refiere. Ya esté cubierta por escamas, plumas o pelos, la capa externa del cuerpo se organiza en patrones regulares que, entre otras funciones, confieren mayor protección frente a los elementos. Estos patrones no aparecen por casualidad. Conocemos media docena de genes que ayudan a las células a detectar su dirección de modo que puedan seguir patrones específicos. Por ejemplo, las células pilosas del ratón suelen crecer en paralelo (*derecha*). Pero cuando uno de estos genes direccionales (*Frizzled6*) se altera, los pelos crecen en remolinos (*más a la derecha*).


Patrón de pelo normal


Patrón de pelo mutante

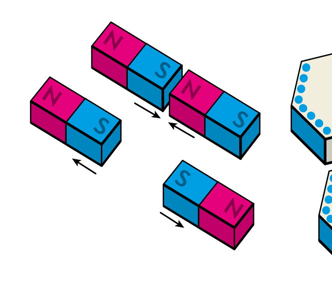
De imanes a células:

Inspirados en los imanes, los autores sugieren una explicación sobre cómo las células detectan su dirección en los tejidos. Los imanes se alinean de tal modo que los polos opuestos se atraen (*rojo y azul, derecha*) y los polos iguales se repelen (*azul y azul*).

Quizás algo similar suceda en las células epiteliales, que normalmente se alinean formando una monocapa. Ciertas proteínas que detectan la dirección se empujan mutuamente (interaccionan negativamente) cuando se encuentran en la misma célula, pero se atraen (interaccionan positivamente) cuando se hallan en células adyacentes (*más a la derecha*). Estas interacciones crean las regiones azules y rojas representadas abajo.

Como las proteínas se empujan y se cambian alternativamente de una fila a la siguiente, el patrón de asimetría se propaga hasta que toda la capa queda polarizada.

Polaridad en los imanes

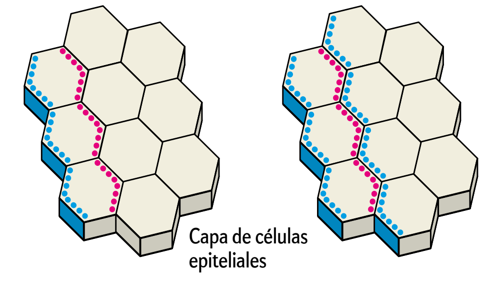


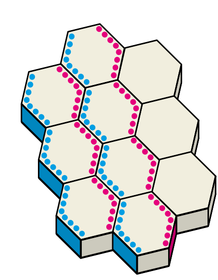
Polaridad en las células epiteliales

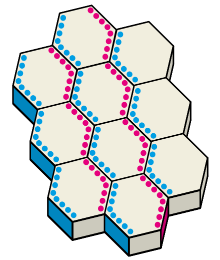
La interacción positiva ocurre entre las proteínas de células adyacentes

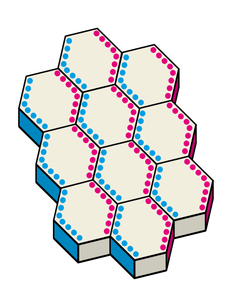
La interacción negativa ocurre entre las proteínas de la misma célula

Propagación del patrón de polaridad a lo largo del tiempo →


Capa de células epiteliales







que se atraen y otro en que se repelen. Las proteínas Van Gogh ubicadas en el lado de las células alares más cercano al cuerpo parecen atraer a las proteínas frizzled de la superficie adyacente de las células vecinas. Mientras que, en el seno de cada célula, las proteínas frizzled y Van Gogh se repelen entre sí y acaban en lados opuestos de la misma. Hasta hoy no se conoce el mecanismo de esas presuntas fuerzas de atracción y repulsión, por lo que sigue siendo un área de intensa investigación.

Para comprender cómo funciona ese modelo de difusión de señales direccionales entre grupos de células, imaginemos una lámina compuesta de muchas filas de células con proteínas de polaridad planar que se distribuyen más o menos al azar en cada célula. Después situemos en el lado proximal de la lámina una nueva fila de células cuyas proteínas no se distribuyan erráticamente: las proteínas frizzled quedarán alineadas en el lado distal y las Van Gogh en el proximal de cada célula. El modelo predice que las fuerzas de atracción entre las proteínas frizzled de la nueva primera fila de células y las proteínas Van Gogh de la recién convertida segunda fila, que de otra manera estarían esparcidas al azar, atraerán a más proteínas Van Gogh hacia la superficie proximal de la segunda fila de células (*véase el recuadro* «Organizadores de los tejidos»).

Las proteínas frizzled de la segunda fila, sin embargo, se comenzarán a acumular en el lado distal de las células, lejos de

CORTESÍA DE JEREMY NATHANS (*fotografías del pelo*); JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*)

las proteínas Van Gogh que se acumulan en el lado proximal. Como las proteínas frizzled se reúnen en el lado distal de la segunda fila de células, atraerán a las proteínas Van Gogh hacia la superficie próxima contigua de la tercera fila. De ese modo, el patrón asimétrico de las proteínas de polaridad tisular se transmitirá de una fila de células a la siguiente a lo largo de la lámina celular.

Este modelo concuerda con una gran cantidad de datos experimentales. En concreto, el modelo predice que los patrones de asimetría de las proteínas deberían de ser extremadamente estables porque cualquier célula descarriada, esto es, con un reparto incorrecto de las proteínas de la polaridad, sería reorientada correctamente gracias a las señales de las células vecinas proximales y distales. De esta manera, cada célula crea su propia brújula, que define la orientación suya e influye en la de las células vecinas.

Aquellos organismos cuyas células conocen su ubicación en el cuerpo gozan de una indiscutible ventaja evolutiva: los tejidos complejos ya no precisan ser simétricos en todas direcciones y eso abre la puerta a la especialización de las diversas partes

VARIACIONES DE UN TEMA

Los insectos no son los únicos animales que exhiben polaridad planar. Inspirados por los experimentos en *Drosophila* de Gubb y de Adler, otros investigadores (Nathans entre ellos) comenzaron a buscar esos genes en los vertebrados. Tales experimentos, y los estudios posteriores de secuenciación a gran escala de genomas, destaparon genes de la polaridad similares en todo el reino animal. Curiosamente, no parece haber genes así en las plantas, de lo que se deduce que los patrones de belleza de las flores y de otros órganos vegetales están regidos por sistemas de polaridad totalmente distintos.

Por razones que no están claras, los mamíferos poseen múltiples versiones de los genes de la polaridad de *Drosophila*. La especie humana y otros mamíferos presentan tres genes *starry night*, mientras que la mosca de la fruta tiene solo uno. Los genes *frizzled* y *dishevelled* también cuentan con múltiples copias. A Nathans le interesa sobre todo detallar el sistema de polaridad planar de los mamíferos. Como sucedió con los primeros experimentos en insectos, el punto de partida más accesible es la piel, en este caso el pelo.

En el ala de la mosca cada célula produce un pelo, en cambio, el pelo de mamífero nace de un folículo compuesto por docenas o cientos de células. Y, a diferencia de las células vecinas en las alas del insecto, los folículos pilosos de los mamíferos no se tocan porque suelen quedar separados por docenas de células cutáneas. A pesar de tales diferencias en la estructura de la superficie cutánea de los insectos y los mamíferos, la eliminación de los genes de la polaridad tiene consecuencias muy similares en ambas clases zoológicas. En 2004, Nino Guo, entonces estudiante en el laboratorio de Nathans, eliminó el gen *Frizzled6* del ratón con métodos de ingeniería genética. Guo y Nathans se sorprendieron al ver que los folículos pilosos de los ratones mutantes ya no eran paralelos entre sí, sino que se habían reorientado creando espirales que recordaban a las de las alas mutantes de *Drosophila*.

La mayor sorpresa se produjo, empero, cuando el laboratorio de Nathans comenzó a estudiar las conexiones entre las neuronas del cerebro de los mamíferos. Las principales vías de esta compleja maraña se tejen durante el desarrollo embrionario: las neuronas emiten axones (los «cables» que hacen posible la comunicación a larga distancia en el cerebro) hacia dianas situadas a lo largo de rutas predefinidas. Nathans y su colega Yanshu Wang, de la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins, descubrieron que *Frizzled3* ejercía una función esencial en la orientación de los axones a través del laberinto del tejido nervioso embrionario. La supresión del gen *Frizzled3* en los ratones impidió que los axones se orientaran y estos comenzaron a seguir trayectorias aberrantes. El grupo de Nathans decidió comprobar si el gen *Frizzled6*, tan importante para la disposición del pelo, podría sustituir a *Frizzled3*, y viceversa. Con ratones modificados genéticamente, demostraron que *Frizzled3* podía suplir a *Frizzled6* y dar lugar a patrones normales del pelo. Sin embargo, *Frizzled6* solo logró sustituir parcialmente a *Frizzled3* en la orientación de los axones. De ello se deduce que los sistemas de polaridad de la piel y del cerebro del ratón son similares pero no idénticos.

Los sistemas de polaridad desempeñan un papel importante en la vida de los vertebrados, desde el embrión de pocos días hasta el movimiento de la respiración cuando los cilios de las vías aéreas expulsan la mucosidad acumulada. A medida que ahondamos en el conocimiento de la «propiocepción» celular, nos sorprende cada vez más la belleza del desarrollo embrionario. Entre los muchos cambios genéticos que engendraron la increíble diversidad del reino animal se halla un grupo de genes de señalización de la polaridad. Estos genes y proteínas han cosechado tal éxito en los últimos millones de años que los animales complejos siguen recurriendo a ellos para resolver numerosos retos evolutivos. IyC

PARA SABER MÁS

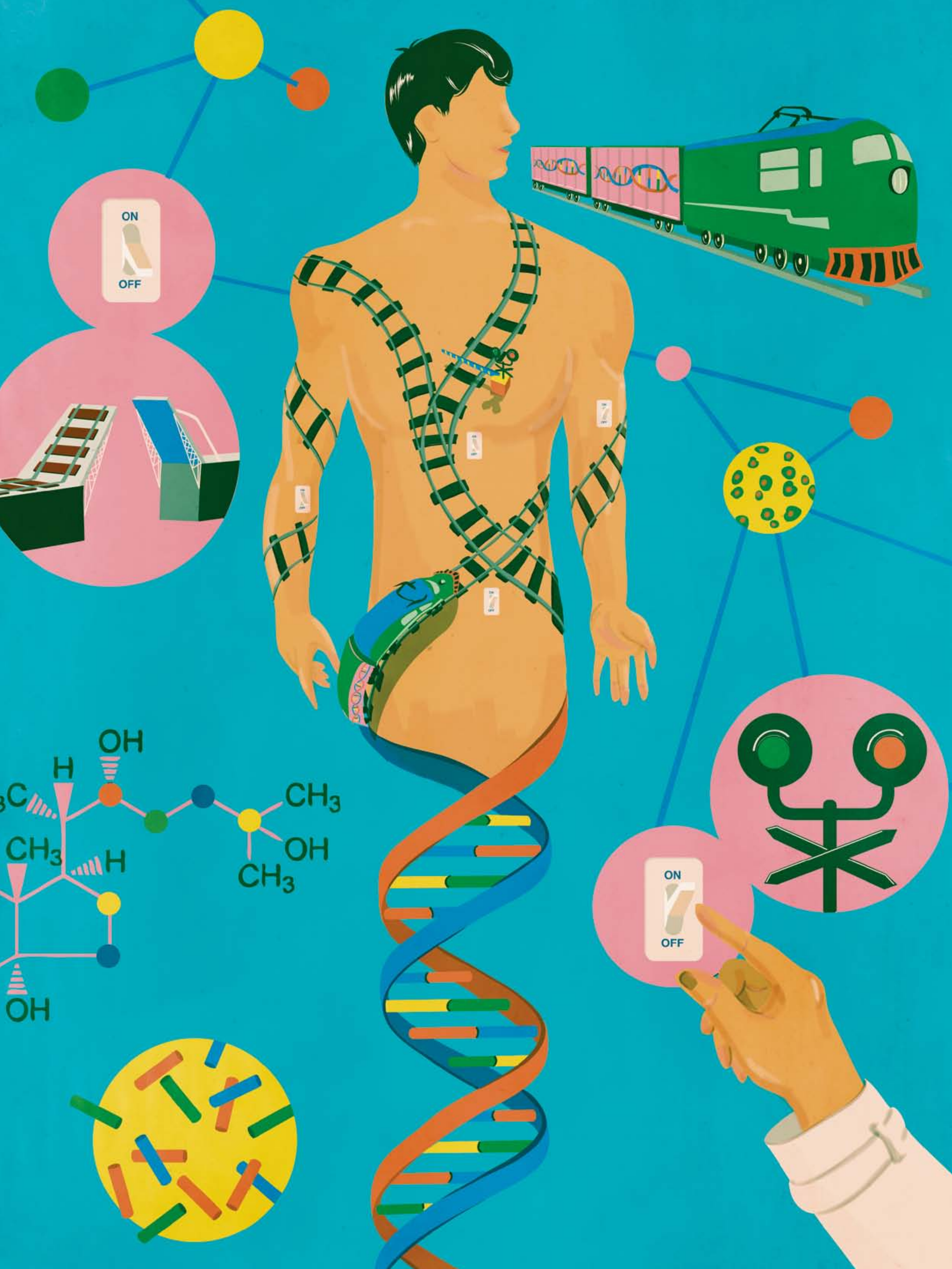
Planar signaling and morphogenesis in *Drosophila*. Paul N. Adler en *Developmental Cell*, vol. 2, n.º 5, págs. 525-537, mayo de 2002.

When whorls collide: The development of hair patterns in *Frizzled 6* mutant mice. Yanshu Wang, Hao Chang y Jeremy Nathans en *Development*, vol. 137, n.º 23, págs. 4091-4099, diciembre de 2010.

EN NUESTRO ARCHIVO

Arquitectos moleculares del diseño corporal. William McGinnis y Michael Kuziora en *IyC*, abril de 1994.

Eversión y cierre de los discos imaginales. José C. Pastor, Enrique Martín y Antonio García-Bellido en *IyC*, enero de 2006.



ON
OFF
OH
H
CH3
CH3
H
OH
CH3
OH
ON
OFF

MEDICINA

UN INTERRUPTOR



PARA LA TERAPIA GÉNICA

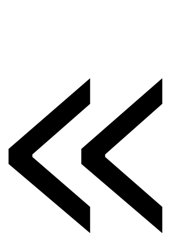
El camino que llevará a una mayor seguridad de este tratamiento pasa por el diseño de interruptores moleculares que permitan activar o desactivar los genes introducidos

Jim Kozubek

GIORDANO POLONI (*página opuesta*); © SERGEIKOROLKO/ISTOCKPHOTO (*interruptor*)

Jim Kozubek es biólogo computacional y redactor científico.





Los humanos no mudamos la piel», sentencia R. J. Kirk. Este excéntrico multimillonario dirige sus negocios desde West Palm Beach (Florida), un agradable paraje donde abundan los pelícanos y los manglares. Con una fortuna amasada con los medicamentos de administración oral, le había telefoneado para hablar de sus últimos proyectos en el campo de la biotecnología. No esperaba acabar escuchando nada relacionado con animales. Pero resulta que la muda de los insectos, la sustitución del exoesqueleto viejo y ceñido por otro renovado y holgado, presenta interesantes propiedades que adaptadas a la terapia génica, aún en fase experimental, la harían más segura.

A los médicos les gustaría introducir en las personas copias de genes funcionales para tratar una serie de trastornos hereditarios. Los genes dotan a las células de las instrucciones para fabricar las proteínas, entre otras moléculas, de modo que la inserción de un gen funcional en el organismo puede, en teoría, asegurar el suministro permanente de cualquier proteína deficitaria que un paciente pueda necesitar. Pero la terapia génica ha tenido una historia problemática, en parte porque no hemos logrado controlar con precisión el punto de inserción de ese nuevo gen en el ADN celular o cómo será su actividad una vez implantado allí (y cuánta proteína producirá). Estos problemas pueden degenerar en efectos indeseados, como la aparición de tumores malignos.

Una solución lógica al problema de que se sinteticen proteínas en lugares y volúmenes inadecuados consistiría en combinar el gen terapéutico con un interruptor que lo activara o desactivara según fuera necesario. Pues da la casualidad de que los insectos poseen un interruptor tal para controlar la muda, afirma Kirk, presidente y director ejecutivo de Intrexon, empresa que desarrolla nuevas técnicas de ingeniería genética.

Y ahí radica la clave. La muda de los insectos es un proceso irreversible: una vez iniciada no se detiene. La vía genética que dirige el proceso permanece completamente inactivada hasta el momento oportuno. El gen que interesa a Kirk funciona como un interruptor general de toda esa actividad. Codifica una hormona llamada ecdisona. A medida que esta se extiende por el cuerpo del insecto, activa un nutrido número de genes que inician la confección del nuevo exoesqueleto. En cuanto está listo, el insecto se deshace del viejo. Cuando la muda se acerca a su fin, los niveles de ecdisona caen a cero y la vía genética se desactiva de inmediato. Y lo más importante para Intrexon es que, una vez apagado, el interruptor es inviolable: sin ecdisona la muda no comienza. El interruptor impide que el grupo de genes actúe hasta el momento de una nueva muda [*véase* «Regulación hormonal de la metamorfosis en los insectos», por Xavier Bellès; Investigación y Ciencia, octubre de 2015].

Los científicos de la empresa decidieron aprovechar esa infalibilidad para controlar con precisión los genes introducidos en los pacientes. Imagine que los genes trasplantados incorporaran un interruptor biológico que se encendiese —y, por tanto, activase el gen terapéutico— únicamente en presencia de moléculas de ecdisona modificadas para operar en el contexto de la fisiología humana. Los pacientes que recibiesen una dosis pequeña de este fármaco (cuyo nombre técnico es ligando) activarían solo unas pocas copias del nuevo gen, que produciría pequeñas cantidades del compuesto codificado por el mismo. Aquellos que recibiesen una dosis elevada del fármaco activarían muchas copias del gen y producirían grandes cantidades del compuesto en cuestión. Ante una emergencia imprevista, la retirada del ligando anularía todo el proceso. Sin ecdisona el gen introducido quedaría silenciado. Y como ventaja adicional, la ecdisona no interferiría con ningún otro gen porque el cuerpo humano ni usa ni precisa la hormona para regular ningún otro tipo de actividad genética. O, tal y como Kirk apostilla: «Los humanos no mudamos la piel».

Durante los últimos ocho años, Intrexon ha «conectado» sus interruptores de ecdisona a miles de genes humanos y ha comprobado en experimentos de laboratorio que la hormona es tiene la capacidad de controlar prácticamente cualquier gen del

EN SÍNTESIS

Los primeros experimentos con terapia génica fueron problemáticos, en parte porque no se pudo controlar la actividad de los genes insertados.

Ahora se intenta resolver el problema con el diseño de interruptores moleculares que, por control remoto, modifiquen la función del gen trasplantado sin contratiempos.

Algunos de esos interruptores génicos ya se están combinando con inmunoterapias experimentales contra el cáncer en ensayos clínicos.

organismo. Además, el grupo de Kirk ha añadido un segundo mecanismo de control incorporando promotores específicos de la célula a sus interruptores. Dichos promotores son segmentos de material genético que solo permiten que los genes se activen («se expresen») en ciertas células, sean neuronas, glóbulos blancos o células del hígado, o en determinadas condiciones, como en entornos donde escasee el oxígeno, como sucede en los tumores. La incorporación de esos controladores moleculares reduce aún más la probabilidad de efectos secundarios en partes del organismo ajenas al tratamiento.

Entretanto, otros grupos están investigando nuevos procesos biológicos para elaborar sus propios interruptores genéticos y los mecanismos de control accesorios. La incorporación de los interruptores a los genes, susceptibles de ser activados o desactivados a voluntad desde ese momento, mejoraría tanto la eficacia y la seguridad de la terapia génica que pasaría a formar parte de la práctica médica general. O, por lo menos, esa es la idea. Los ensayos preliminares en humanos indican que la estrategia del interruptor podría funcionar según lo previsto. Hasta la fecha se ha estudiado sobre todo en el marco del cáncer y será en este campo donde seguramente se cosechen los primeros grandes logros.

LOS PRIMEROS ENSAYOS

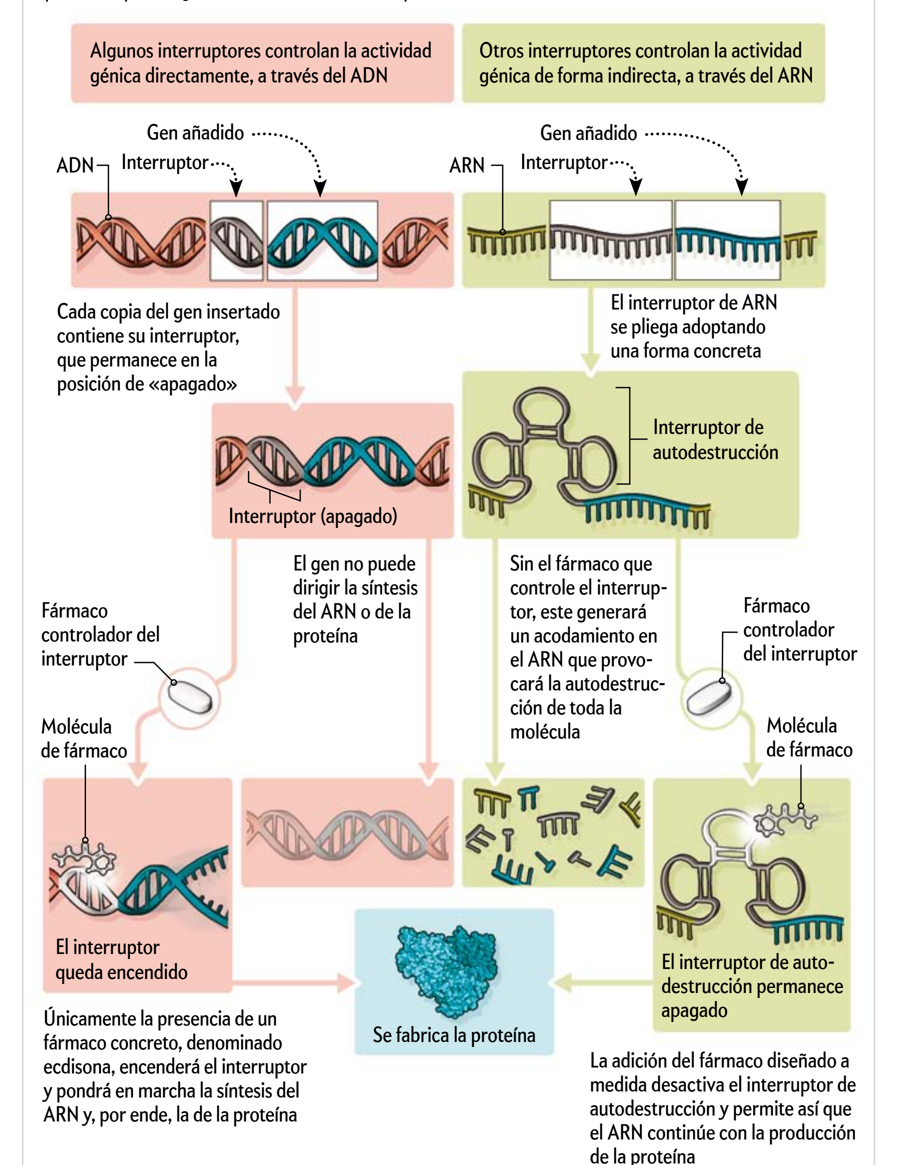
La estrategia basada en los interruptores pretende conseguir que la inmunoterapia contra el cáncer deje de suponer una experiencia desgarradora para los pacientes. La inmunoterapia antitumoral, que tantos titulares acapara en la prensa en los últimos tiempos, persigue revitalizar la respuesta inmunitaria acallada por las señales químicas segregadas por el tumor maligno, o bien desatar desde cero una respuesta antitumoral más potente que la del paciente [*véase* «Inmunoterapia contra el cáncer», por Lloyd J. Old; Investigación y Ciencia, noviembre de 1996]. El problema radica en que el sistema inmunitario reactivado se desboca con facilidad, desencadenando fiebres potencialmente mortales o la acumulación de líquido en todo el cuerpo, con consecuencias igualmente nefastas.

En este momento los interruptores génicos se están evaluando en ensayos clínicos con un pequeño colectivo rigurosamente seleccionado de pacientes aquejados por melanoma (un tipo de cáncer cutáneo) o por cáncer de mama recurrentes, entre otros males. Los médicos inyectan a uno o dos tumores del enfermo genes diseñados para estimular la producción de citocinas, moléculas señalizadoras (como el interferón y varias interleucinas) con las que el sistema inmunitario controla y modifica la lucha contra los tumores. No se cree necesario tratar todas las lesiones malignas del paciente, porque una vez que el sistema inmunitario haya sido entrenado para atacar un foco

ASÍ FUNCIONA

Dos formas de controlar la actividad de los genes

Una de las mayores dificultades que plantea el desarrollo de las terapias génicas estriba en garantizar que los genes recién insertados no sean demasiado activos, porque, entre otras cosas, pueden provocar un cáncer. Todos los genes, que están formados por ADN, instruyen a las células para fabricar otra molécula, denominada ARN, que en general dirige a su vez la fabricación de las proteínas. Los investigadores están estudiando varias estrategias (*dos de ellas se muestran en la figura inferior*) para crear interruptores biológicos que pongan en marcha la actividad de un gen o lo desactiven por completo (y con ello la síntesis de proteínas).



TAMI TOLPA

de células cancerosas, buscará por sí solo otros focos dispersos por el cuerpo.

Las citocinas desencadenan una amplia gama de reacciones fisiológicas, desde la dilatación de los vasos sanguíneos para que los glóbulos blancos afluyan rápidamente al foco de la infección, hasta la activación de los despiadados linfocitos T citotóxicos que, entre otros cometidos, están especializados en la destrucción de las células tumorales. Pero hasta la fecha, los médicos no han obtenido buenos resultados en los pacientes con una de las citocinas más potentes, la interleucina 12 (IL-12).

Este fracaso se explica en parte por la tendencia de la IL-12 a desatar «tormentas de citocinas», un proceso autodestructivo aparentemente desencadenado por el sistema inmunitario contra el propio organismo. Vertida en el torrente circulatorio, la IL-12 provoca una brusca caída de la presión arterial y causa problemas pulmonares y cardíacos que pueden devenir fácilmente en fallo orgánico y muerte. Laurence Cooper, médico investigador del Centro M. D. Anderson contra el Cáncer de la Universidad de Texas y director de la empresa biotecnológica Ziopharm Oncology, asegura que, paradójicamente, son cientos los artículos científicos que avalan su eficacia en el microentorno de los tumores. La IL-12 se ha convertido en el santo grial de la inmunoterapia. Vistos los resultados, es mejor suministrar tanta IL-12 como sea posible a un único tumor, pero no tanta como para desatar la temible tormenta. Y es en este punto donde la técnica de los interruptores podría resultar revolucionaria.

La idea consiste en insertar los genes de la IL-12 dotados de interruptor en el tumor del paciente, de modo que se instalen en muchas células, incluidas las células inmunitarias infiltradas en el tumor, y estimulen a estas últimas. Puesto que el interruptor solo se activará en presencia del ligando, es posible incrementar los niveles de citocina en el tumor aumentando lentamente la cantidad de fármaco. Si se presagia una tormenta de citocinas, se puede omitir la dosis siguiente y evitar males mayores.

Los datos publicados hasta la fecha por Ziopharm, que coopera con Intrexon en el desarrollo de tratamientos a base de citocinas con interruptor, son esperanzadores. Kirk reconoce que para poner a prueba su estrategia deberían haber escogido algo menos potente que el gen de la IL-12, con el que un paso en falso puede ser fatal. Pero justifica la elección de uno de los genes más difíciles por el deseo de probar el interruptor en condiciones adversas. En otras palabras, ¿permanecerá totalmente inactivo un interruptor que esté apagado cuando resulte esencial que así sea?

Los resultados de dos estudios de seguridad efectuados en varios centros médicos con una cuarentena escasa de pacientes parecen indicar que sí. Aunque ninguno se curó, el tratamiento controlado por el interruptor parecía ser razonablemente seguro. Como era de prever, algunos pacientes comenzaron a manifestar síntomas de una peligrosa sobrerreacción que no tardó en remitir tras dejar de tomar las pastillas de ecdisona.

También se hallaron indicios de que la terapia pudo ser útil. En uno de los estudios, se inyectó el gen con el interruptor a 12 mujeres con cáncer de mama metastásico. Todas habían recibido una media de ocho tratamientos oncológicos y su esperanza de vida era escasa. Por diversos motivos solo se pudo valorar el efecto de la nueva terapia en siete pacientes. El tratamiento con la IL-12 redujo el tamaño de algunos tumores y, en tres mujeres, la enfermedad permaneció estable, por lo menos durante la corta duración del ensayo. El segundo estudio, llevado a cabo en 26 pacientes que habían recibido por término medio seis tratamientos contra el melanoma metastásico, mostró un repunte de los niveles de citocina y de otros procesos antitumorales. En mayo de 2015, Ziopharm inició otro estudio con la IL-12 controlada por interruptor como tratamiento experimental contra el glioblastoma multiforme, un tipo de cáncer cerebral especialmente agresivo.






INSPIRADO POR LA NATURALEZA: La hormona ecdisona regula el proceso de la muda, que convierte a los insectos, como esta mariposa, en individuos adultos. En la actualidad, una compañía biotecnológica ha convertido la ecdisona en un interruptor de seguridad muy necesario para la terapia génica.

STEPHEN J. KRASEMANN, SCIENCE SOURCE

RIBOINTERRUPTORES

Richard Mulligan, de la Escuela de Medicina de Harvard, ha estado trabajando con un tipo distinto de interruptor. Recurre a pequeñas moléculas de ARN naturales: las ribozimas. Descubiertas en los años ochenta del siglo pasado, las ribozimas semejan las enzimas porque catalizan reacciones químicas en el organismo, pero a diferencia de ellas no son proteínas, sino moléculas de ARN. Una de las características provechosas para los interruptores es que algunas ribozimas tienen la capacidad de cortarse a sí mismas y de promover la autodestrucción de las moléculas genéticas a las que se fijan.

Mulligan no une la ribozima a un gen, sino a una molécula de ARN mensajero (ARNm). Cuando la célula quiere sintetizar una proteína, primero transcribe el ADN del gen pertinente en

una molécula de ARNm (transcrito de una sola hebra que viaja por la célula) y después traduce ese ARNm en la proteína. Para la célula, la introducción en su seno del segmento de ADN o de su correspondiente ARNm se salda con el mismo resultado: la fabricación de la proteína.

En un primer paso, los investigadores ensamblarían e inyectarían una hebra de ADN que codifica la ribozima «que se corta a sí misma» y la proteína terapéutica seleccionada. Si la célula humana transcribiese ese ADN sintético en ARNm, la parte correspondiente a la ribozima se cortaría a sí misma, y ello haría que el resto de la molécula de ARNm pareciera defectuoso; posteriormente, la maquinaria celular circundante rompería el ARNm en pedazos y paralizaría todo el proceso de síntesis de la proteína. El gen quedaría en la práctica desactivado.

La introducción de genes controlados por interruptor, activables y desactivables a voluntad, dotaría a la terapia génica de la seguridad y eficacia necesarias para formar parte de la práctica médica ordinaria

Desde el año 2000, Ronald R. Breaker y sus colaboradores de la Universidad Yale han demostrado cómo proteger el ARNm y detener la síntesis de las proteínas a voluntad. El truco consiste en unir la ribozima a otra molécula más denominada aptámero, una especie de sensor concebido para ser activado por un fármaco. Solo en presencia de este último, el sensor cambia de forma e impide que la ribozima destruya el ARNm. Como el ARNm intacto conserva toda su longitud, la célula puede fabricar la proteína. Sin el fármaco que actúe sobre el sensor, la ribozima y el ARNm se autodestruyen.

En 2004, Mulligan y sus colaboradores dotaron a sus interruptores de ribozima con sensores farmacosensibles hechos a medida y actualmente siguen perfeccionando la técnica. Los sensores se pueden diseñar con gran especificidad, afirma Mulligan, lo que reduce aún más el riesgo de efectos secundarios. A semejanza de la ecdisona, el ARNm unido al ribointerruptor solo iniciará la producción de la proteína si el paciente ingiere la píldora adecuada. Si la toma, el gen se activará; si deja de tomarla, se desactivará.

INTERRUPTORES MÚLTIPLES

Los interruptores génicos sencillos aún no están perfeccionados, pero ya es posible vislumbrar un futuro no muy lejano en que los interruptores múltiples serán la norma y ejerceremos un control cada vez más preciso sobre la terapia génica. La combinación de la terapia génica basada en los interruptores con otros tratamientos contra el cáncer podría resultar tremendamente fructífera.

Laurence Cooper, del Centro M. D. Anderson, ya está combinando un par de genes dotados de interruptor con un tratamiento a base de células antitumorales. Los genes aportarán la IL-12 y otra citocina, la interleucina 15 (IL-15); los ensayos en el laboratorio sugieren que la IL-15 hace que la IL-12 estimule aún con mayor eficacia las células inmunitarias. La tercera parte del tratamiento experimental consiste en un grupo de glóbulos blancos modificados con técnicas de ingeniería genética: los linfocitos T de tipo CAR. Estos son mejores que sus homólogos naturales en la labor de destruir el tejido canceroso. En principio, la incorporación de los genes de la IL-12 y la IL-15 dotados de interruptor a dichos linfocitos debería mejorar su potencia y eficacia. Puesto que los interruptores génicos y sus activadores permiten ajustar los niveles de ambas citocinas por separado, no debería resultar difícil modular con precisión el tratamiento y obtener los mejores resultados con la mínima cantidad de IL-12, con lo que el riesgo de una tormenta de citocinas será aún menor. De manera un tanto caprichosa, Cooper ha bautizado a esta nueva generación de células genéticamente modificadas como vehículos [en inglés, *cars*] activados por control remoto.

Aún quedan muchos obstáculos técnicos por resolver, pero el rumbo de los avances parece estar trazado. Si en los años noventa la posibilidad de insertar nuevos genes en nuestro organismo constituyó el primer gran paso de la ingeniería genética, el control de nuestros genes por medio de interruptores representará, sin duda, el segundo. Algún día, muchas de las píldoras recetadas por los médicos servirán para activar genes transferidos en el momento y en el lugar precisos, no para inundar los órganos y los tejidos con potentes fármacos que actúan tanto donde son necesarios como donde no lo son, causando efectos secundarios. Muchos medicamentos dejarán de fabricarse en los tanques o en los biorreactores de las plantas farmacéuticas. En vez de ello, las nuevas terapias génicas permitirán a los propios pacientes fabricar grandes cantidades de una molécula en el momento y en el lugar precisos. IyC

PARA SABER MÁS

Semi-synthetic ecdysteroids as gene-switch actuators: Synthesis, structure-Activity Relationships, and Prospective ADME Properties. Silvia Lapenna y col. en *ChemMedChem*, vol. 4, n.º 1, págs. 55-68, enero de 2009.

Small self-cleaving ribozymes. Adrian R. Ferré-D'Amaré y William G. Scott en *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, vol. 2, n.º 10, art. a003574, octubre de 2010. **http://cshperspectives.cshlp.org/content/2/10/a003574.long**

The war on cancer is evolving. Vídeo de Laurence Cooper, 15 de octubre de 2013. **www.acgtfoundation.org/video/dr-laurence-cooper-war-cancer-evolving**

EN NUESTRO ARCHIVO

Ribointerruptores. Jeffrey E. Barrick y Ronald R. Breaker en *IyC*, marzo de 2007.

Terapia génica, segunda parte. Ricki Lewis en *IyC*, mayo de 2014.

por H. Joachim Schlichting

H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

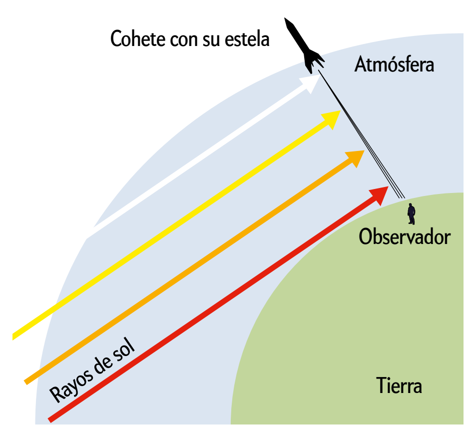


El misterio de la sombra azul

Entre el sol poniente y la luna naciente, la estela de un cohete proyecta un enigmático «rayo de sombra». ¿A qué se debe?

En febrero de 2001, durante el despegue del transbordador espacial *Atlantis* a bordo de un cohete hacia la Estación Espacial Internacional, pudo verse en el cielo un espectáculo fascinante. Entre la luna naciente —que a primera vista podríamos haber confundido con el sol poniente— y la estela del cohete, se dibujó una enigmática línea azul (*véase la imagen derecha*). Para explicar por qué, habremos de recurrir a todo tipo de consideraciones físicas. Y ese no es el único misterio que hay en esta imagen.

Vayamos por partes. La estela de gases reproduce de manera impresionante la trayectoria del cohete. Al igual que las estelas de condensación de los aviones, las de los cohetes están formadas principalmente por gotas de agua, por lo que podemos deducir que la humedad del aire era bastante elevada. Vemos que la estela se ensancha en su parte inferior, ya que el movimiento irregular del aire se encarga en cuestión de minutos de que el vapor vaya dispersándose, se evapore y finalmente desaparezca.



LIENZO CREPUSCULAR: Si observamos el lanzamiento de un cohete justo después de que el sol haya desaparecido tras el horizonte, la parte inferior de la estela que deja la nave solo estará iluminada por la luz difusa del cielo. Sin embargo, sobre los tramos superiores sí incidirá directamente la luz del sol, por lo que estos aparecerán teñidos por la misma sucesión de colores que muestra el cielo en el transcurso del atardecer.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN EL AUTOR

La primera pregunta que podemos hacernos es qué cuerpo celeste brilla al fondo. El color crepuscular del cielo podría hacernos pensar que estamos mirando hacia el oeste, hacia la puesta de sol. Pero, de ser el caso, ¿no deberíamos ver un disco de color amarillo rojizo? ¿Y cómo explicar la franja oscura que se extiende sobre el horizonte?

Parece evidente que no se trata del sol, sino de la luna llena que se eleva al atardecer, y que, por tanto, miramos hacia el este. Allí también atardece, ya que desde esa dirección nos llega la luz rojiza del sol poniente, la cual es dispersada hasta nuestros ojos. Pero este «anticrepúsculo» no nos resulta muy familiar: debido a que su luz ha recorrido dos veces el largo camino a través de la atmósfera (desde el sol al horizonte y de vuelta al observador), normalmente resulta tan débil que ni siquiera podemos apreciarla.

Por tanto, el sol no está delante, sino detrás de la cámara, e ilumina la luna casi de frente. También podemos concluir que el astro rey ya debe haberse ocultado tras el horizonte occidental, pues sobre el oriental podemos ver la sombra que proyecta nuestro planeta. Esta franja horizontal de color azul oscuro va creciendo y confina la luz del crepúsculo en una banda de color púrpura, el llamado «cinturón de Venus». De modo que, sobre la parte inferior de la estela del cohete ya no incide directamente ningún rayo de sol, sino únicamente la luz difusa del cielo. Más arriba, en cambio, la estela adopta tonos rojos y amarillos. La zona más alta es la única que aún recibe de lleno la luz solar, motivo por el que brilla de manera cegadora.

Así pues, lo que un observador en la superficie de la Tierra suele experimentar como una sucesión temporal, queda plasmado espacialmente en ese particular «lienzo» que se eleva hacia el cielo. Sus regiones superiores todavía «ven» el sol relativamente alto sobre el horizonte; las intermedias reflejan la luz amarilla de un sol que, desde su punto de vista, ya está bajo; y, por, último, las partes inferiores registran la luz roja crepuscular que produce el sol cuando se halla muy próximo al horizonte.

Monedas de sol

Pero vayamos, por fin, con la línea recta de color azul oscuro que se proyecta sobre la luna llena desde la estela del cohete. Es lógico suponer que se trata de la sombra de esta: en efecto, la estela bloquea la luz solar que, de otro modo, incidiría sobre el área azulada, por lo que ya no puede ser dispersada desde allí hasta nuestros ojos. Eso explicaría por qué esta zona aparece más oscura que sus alrededores, expuestos a la luz solar. Pero ¿no debería una estela con una forma tan irregular producir una sombra con un aspecto acorde? Como mínimo, deberíamos poder recuperar las irregularidades en la sección transversal del rayo. Sin embargo, este parece un cilindro circular.

Lo anterior no debería sorprendernos, pues el fenómeno responsable resulta muy familiar. Si caminamos un día soleado por el bosque, bajo la corona de los árboles, veremos en el suelo manchas de luz, o «monedas de sol». Tales manchas son en realidad circulares (como puede comprobarse al proyectar perpendicularmente sobre una pequeña superficie los rayos que las producen), pero suelen parecer elípticas, ya que en nuestras latitudes la luz siempre cae de mane-

EL 7 DE FEBRERO DE 2001, el transbordador *Atlantis* partió hacia la Estación Espacial Internacional justo al atardecer. Como consecuencia de un curioso fenómeno óptico, la estela del cohete proyectó un «rayo de sombra» sobre la luna llena.



ra oblicua sobre el suelo. En cualquier caso, la propiedad que nos interesa aquí es que la forma de la mancha no parece guardar ninguna relación con la de los huecos del follaje, al menos cuando estos se encuentran a suficiente distancia del suelo. ¿Por qué?

La explicación a este fenómeno, que ya observó en su día Aristóteles, la dio hace quinientos años el astrónomo alemán Johannes Kepler. En esencia, las manchas de luz que vemos en el bosque corresponden a imágenes estenopeicas (de cámara oscura) del sol, las cuales reproducen con fidelidad la forma del objeto original.

Nuestra estela de humo no es ningún hueco en el follaje, sino más bien todo lo contrario: un obstáculo en el camino de los rayos. Sin embargo, el fenómeno de las monedas de sol funciona también «en negativo»: si colocamos hojas en la trayectoria de los rayos de sol y a suficiente distancia del observador, su sombra también será redonda, con independencia de la forma de las hojas. Es así como nuestro rayo de sombra adquiere su aspecto circular a grandes distancias de la estela. Por otro lado, que los bordes de la sombra se vean ligeramente borrosos está relacionado con el hecho de que la estela (el «agujero inverso» de la cámara oscura) es, a pesar de las grandes distancias de las que hablamos, demasiado extensa para generar una proyección completamente nítida.

Perspectiva engañosa

Pero nuestro rayo de sombra plantea más preguntas. Visto desde la estela, se dirige hacia el punto antisolar; es decir, hacia el punto imaginario situado exactamente opuesto al sol. En el momento de la fotografía, allí se encuentra la luna, la cual aparece iluminada por completo. Pero, si nos fijamos mejor, nos percataremos de que el rayo de sombra no alcanza su objetivo de pleno, sino que lo hace un poco más abajo. Así que, en sentido estricto, el satélite ya dejó atrás el plenilunio —aunque aún lo percibamos como luna llena— y salió un poco antes de que se pusiera el sol.

Hay un último detalle que aún nos puede sorprender: si el sol ya se encuentra detrás del horizonte, ¿por qué el rayo de sombra parece dirigirse hacia abajo? Esto último solo puede tratarse de una ilusión relacionada con la perspectiva, puesto que el sol, ya oculto, ilumina la parte superior de la estela desde abajo. No hay otra posibilidad: de hecho, la luna no solo está más alta que el sol con respecto al horizonte, sino también más alta que la estela de humo. Así que tampoco debemos alarmarnos por la pérdida de altura del cohete que parece deducirse de la imagen: a pesar de la confusión óptica, continúa elevándose según lo previsto por la NASA.

PARA SABER MÁS

Sonnentaler — Abbilder der Sonne. H. J. Schlichting en *Praxis der Naturwissenschaften — Physik*, vol. 43, n.º 4, págs. 19-23, 1994.
Sonnentaler fallen nicht vom Himmel. H. J. Schlichting en *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, vol. 48, n.º 4, págs. 199-207, 1995.
Vídeo de YouTube en el que se muestra el lanzamiento del transbordador *Atlantis* y la proyección del rayo de sombra: **youtu.be/zzfQIIYbSgQ?t=4m49s**

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

El efecto Droste y los Alcántara

Recursividad, puntos fijos y un problema con el tiempo dentro del tiempo

Los informáticos sienten pasión por las siglas y los acrónimos. Algunos son pequeñas obras de arte, como GNU, el popular sistema operativo abanderado del *software* libre. GNU significa *GNU's Not Unix*, por lo que se trata de un acrónimo recursivo en el que una de sus letras representa... ¡el propio acrónimo!

Dado que los informáticos también adoran la recursividad, los ejemplos abundan: PHP (*PHP: Hypertext Preprocessor*), Pine (*Pine Is Not Elm*), Wine (*Wine Is Not an Emulator*)... Incluso hay versiones no oficiales, como la del motor de búsqueda Bing, que, según las malas lenguas, significa *Bing Is Not Google*. Y en un más difícil todavía nos encontramos con dos perlas: Hurd (*Hird of Unix-Replacing Daemons*), en cuya definición aparece a su vez otro acrónimo, Hird, que significa *Hurd of Interfaces Representing Depth*, con lo que componen un par de acrónimos mutuamente recursivos. Y, para acabar, mi favorito: UIRA que significa *UIRA Isn't a Recursive Acronym*, un acrónimo recursivo paradójico.

Tal vez la forma más elemental y primitiva de recursividad sea el efecto Droste. Este consiste en una imagen que contiene una réplica en miniatura de sí misma: si dicha réplica es fiel, deberá incluir a su vez otra aún menor, la cual contendrá otra más, etcétera. El nombre proviene de una popular marca de chocolates de los Países Bajos que, a principios del siglo xx, empleó este efecto en una de sus imágenes publicitarias. En ella aparecía una enfermera que portaba, justamente, una caja de cacao Droste decorada con una réplica en miniatura de la imagen original. Así pues, en la caja aparecía otra vez la enfermera, la cual llevaba otra caja, y así sucesivamente.

Si bien existen ejemplos muy anteriores en la historia del arte —sobre todo en manuscritos iluminados o en vitrales—, el ámbito en el que este recurso se ha empleado de forma extensa ha sido en el diseño publicitario. Ejemplos bien conocidos los hallamos en las presentaciones de la marca de quesos francesa La Vaca que Ríe, el polvo para hornear estadounidense Royal o el agua embotellada española Mondariz.



LA RECURSIVIDAD ha sido empleada exhaustivamente en el arte y en el diseño publicitario. Esta versión continua de un patrón recursivo muestra los pétalos de una flor dispuestos en una espiral que se contiene a sí misma un número infinito de veces.

Del efecto Droste al caos

Una forma sencilla de conseguir un efecto Droste consiste en enfrentar dos espejos. En ello se basa la portada del álbum de Pink Floyd *Ummagumma*, de 1969 (aunque en este caso se descoloca al observador con un cambio de posición de los componentes de la banda en cada copia del espejo). Inspirándonos en ello, podemos rizar el rizo y crear un efecto Droste dinámico.

Todos hemos sufrido alguna vez el desagradable sonido de un micrófono que se acopla, que recoge su propia señal. Este fenómeno de retroalimentación acústica tiene un equivalente menos molesto en el caso de una señal de vídeo. ¿Qué ocurre si enfrentamos una *webcam* a la pantalla del ordenador al que está conectada? La imagen que aparece en la pantalla es captada por la cámara, emitida por la pantalla,


Juegos matemáticos

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

El efecto Droste y los Alcántara

Recursividad, puntos fijos y un problema con el tiempo dentro del tiempo

Los informáticos sienten pasión por las siglas y los acrónimos. Algunos son pequeñas obras de arte, como GNU, el popular sistema operativo abanderado del *software* libre. GNU significa *GNU's Not Unix*, por lo que se trata de un acrónimo recursivo en el que una de sus letras representa... ¡el propio acrónimo!

Dado que los informáticos también adoran la recursividad, los ejemplos abundan: PHP (*PHP: Hypertext Preprocessor*), Pine (*Pine Is Not Elm*), Wine (*Wine Is Not an Emulator*)... Incluso hay versiones no oficiales, como la del motor de búsqueda Bing, que, según las malas lenguas, significa *Bing Is Not Google*. Y en un más difícil todavía nos encontramos con dos perlas: Hurd (*Hird of Unix-Replacing Daemons*), en cuya definición aparece a su vez otro acrónimo, Hird, que significa *Hurd of Interfaces Representing Depth*, con lo que componen un par de acrónimos mutuamente recursivos. Y, para acabar, mi favorito: UIRA que significa *UIRA Isn't a Recursive Acronym*, un acrónimo recursivo paradójico.

Tal vez la forma más elemental y primitiva de recursividad sea el efecto Droste. Este consiste en una imagen que contiene una réplica en miniatura de sí misma: si dicha réplica es fiel, deberá incluir a su vez otra aún menor, la cual contendrá otra más, etcétera. El nombre proviene de una popular marca de chocolates de los Países Bajos que, a principios del siglo xx, empleó este efecto en una de sus imágenes publicitarias. En ella aparecía una enfermera que portaba, justamente, una caja de cacao Droste decorada con una réplica en miniatura de la imagen original. Así pues, en la caja aparecía otra vez la enfermera, la cual llevaba otra caja, y así sucesivamente.

Si bien existen ejemplos muy anteriores en la historia del arte —sobre todo en manuscritos iluminados o en vitrales—, el ámbito en el que este recurso se ha empleado de forma extensa ha sido en el diseño publicitario. Ejemplos bien conocidos los hallamos en las presentaciones de la marca de quesos francesa La Vaca que Ríe, el polvo para hornear estadounidense Royal o el agua embotellada española Mondariz.

Del efecto Droste al caos

Una forma sencilla de conseguir un efecto Droste consiste en enfrentar dos espejos. En ello se basa la portada del álbum de Pink Floyd *Ummagumma*, de 1969 (aunque en este caso se descoloca al observador con un cambio de posición de los componentes de la banda en cada copia del espejo). Inspirándonos en ello, podemos rizar el rizo y crear un efecto Droste dinámico.

Todos hemos sufrido alguna vez el desagradable sonido de un micrófono que se acopla, que recoge su propia señal. Este fenómeno de retroalimentación acústica tiene un equivalente menos molesto en el caso de una señal de vídeo. ¿Qué ocurre si enfrentamos una *webcam* a la pantalla del ordenador al que está conectada? La imagen que aparece en la pantalla es captada por la cámara, emitida por la pantalla,

LA RECURSIVIDAD ha sido empleada exhaustivamente en el arte y en el diseño publicitario. Esta versión continua de un patrón recursivo muestra los pétalos de una flor dispuestos en una espiral que se contiene a sí misma un número infinito de veces.

90 INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo 2016

EL EFECTO DROSTE consiste en una imagen que contiene una réplica en miniatura de sí misma. El teorema del punto fijo de Banach garantiza que existe un punto común en el que convergen la imagen original y todas sus infinitas copias.

captada otra vez por la cámara, y así una y otra vez. Si apartamos la cámara lo suficiente, obtendremos un efecto Droste: una secuencia de pantallas dentro de pantallas en una sucesión que se aleja.

El fenómeno produce sucesivas reducciones de la imagen, las cuales convergen hacia un punto. Sin embargo, si acercamos la cámara hasta que desde su visor solo observemos la pantalla, sucederá lo contrario: la imagen se expandirá. ¿Qué ocurre si ajustamos la cámara de modo que la pantalla del ordenador quede perfectamente encuadrada?

Apague la luz de la habitación, baje el brillo de la pantalla y suba el contraste. Pase una vela o un mechero encendidos entre la cámara y la pantalla: eso actuará como imagen semilla que será iterada 25 veces por segundo por el circuito de retroalimentación que ha creado. Experimente variando el *zoom*, el foco o el ángulo con el que la cámara encara la pantalla. Después de hipnotizarse con las imágenes, observará que estas pueden clasificarse en cuatro grupos según su evolución temporal: (1) La pantalla se vuelve totalmente blanca o se fija una mancha de luz estable. Este resultado es, en el lenguaje de los sistemas dinámicos, un punto fijo. (2) Aparece una mancha de luz pulsante. Se alcanza un estado estacionario periódico. (3) Asistimos a una frenética aparición y desaparición de manchas de luz sin orden ni concierto. Tenemos caos determinista. (4) Nuestra pantalla exhibe un patrón organizado, complejo y cambiante de manchas de reminiscencias orgánicas.

Con un poco de pericia informática podrá medir la intensidad luminosa de los patrones dinámicos que se van generando. Si representa la variación de intensidad con el tiempo y da con la variable adecuada (cambiando de forma continua y suave el *zoom*, por ejemplo), puede conseguir experimentalmente una cascada de bifurcaciones al caos. Comience con una mancha de luz estable, que verá como una señal constante en su gráfica de intensidad. Varíe el *zoom* hasta conseguir una mancha de luz pulsante que dará como resultado una señal de intensidad de período 2. La variación continua del *zoom* le permitirá recorrer la cascada de bifurcaciones con sucesivos períodos de 4, 8, 16, etcétera, hasta perder finalmente la periodicidad y alcanzar el caos determinista.

Puntos fijos

Desde el punto de vista matemático, el efecto Droste se consigue mediante una «aplicación contractiva», f. Cada punto (x, y) de la imagen original se transforma en el punto $f(x, y) = (x', y')$ en la imagen en miniatura, de tal forma que la distancia entre dos puntos cualesquiera siempre se hace menor. Sobre los puntos de la copia se vuelve a realizar la misma operación, $f(x', y') = (x'', y'')$, y así sucesivamente.

¿Existe algún punto (x^*, y^*) de la imagen original que permanezca fijo bajo f? Es decir, ¿existe un punto (x^*, y^*) tal que $f(x^*, y^*) = (x^*, y^*)$? Gracias al famoso teorema del punto fijo de Banach, sabemos que dicho punto existe y que es único. Observemos además que la segunda copia cumple:

$$f(x', y') = f(f(x, y)) = f^{(2)}(x, y)\,,$$

de modo que, para dibujar la n-ésima minicopia, basta con aplicar $f^{(n)}$ a los puntos de la imagen original. Pero, si (x^*, y^*) es un punto fijo de f, también lo será de todas las $f^{(n)}$. Así que, en una imagen de tipo Droste, la original y todas las copias reducidas tendrán un punto en común: de

hecho, aquel que van acotando más y más las sucesivas imágenes contraídas.

Si extiende en el suelo un mapa de la zona en la que se encuentra, el teorema del punto fijo de Banach le asegura que existe un punto del mapa que coincide exactamente con uno del suelo. Sorprendente, ¿verdad? (Piense que un mapa no es más que el resultado de aplicar una función contractiva sobre la superficie terrestre.) Luitzen Egbertus Jan Brouwer, otro de los padres de los teoremas del punto fijo (hay unas cuantas versiones), comentaba al respecto: «Puedo formular este magnífico resultado de esta otra manera: tomo una hoja de papel y la extiendo, luego otra hoja idéntica que primero arrugo y después aliso y aplano sobre la primera. Habrá un punto de la hoja arrugada que quedará sobre el mismo lugar que el punto equivalente de la primera».

Ahora imagine que, sobre la mesa del comedor de su casa, construye una maqueta realista de su vivienda. Estará usando una aplicación contractiva que asociará a cada punto del espacio real de su hogar un punto en la maqueta. En particular, la maqueta deberá contener a su vez una minimaqueta, que a su vez incluirá otra, etcétera... Estará construyendo una escultura con el efecto Droste. Y, según el teorema del punto fijo de Banach, habrá un punto de la habitación que será común a la infinita sucesión de maquetas.

La ficción alcanza a la realidad

Acabemos con una última vuelta de rosca. En literatura se ha usado con frecuencia el tema del sueño dentro del sueño o el de ficciones dentro de ficciones: baste con recordar a Borges o *Las mil y una noches*. Leyendo el delicioso y disparatado cómic *Hervir un oso*, de Jonathan Millán y Miguel Noguera, nos encontramos con un excelente ejemplo: el de la aclamada serie *Cuéntame cómo pasó*.

La serie empezó a emitirse en 2001 y situaba a la familia Alcántara en la España de 1968. *Cuéntame* lleva 15 años en antena y actualmente están en 1984, de modo que en la ficción han transcurrido 16 años. Podemos concluir entonces que la serie avanza a una velocidad de $16/15 \approx 1{,}07$ años ficticios por cada año real. Así que, en caso de que continuara emitiéndose, en 2496 también transcurriría en el año 2496, con lo que alcanzaría a la propia realidad.

Apuntemos que, previamente, en el año 2031, la serie llegaría a su año ficticio 2001, cuando comenzó a emitirse *Cuéntame*. De modo que dentro de la serie debería comenzar la propia serie. La subserie *Cuéntame* surgida dentro de la original transcurriría a una velocidad de unos 1,07 años por año ficticio, por lo que, vista por un espectador como nosotros, avanzaría al ritmo de $1{,}07^2$ años por cada año real. Por supuesto, esta subserie alcanzaría a su vez su propio año 2001, dando nacimiento a otra subserie que avanzaría a una velocidad de $1{,}07^3$ años ficticios por cada año real.

Llegados a este punto, con infinitas series dentro de series a velocidades cada vez mayores, Millán y Noguera hacen un llamamiento a la relatividad especial, a las velocidades superlumínicas y a la capacidad de precognición que deberían mostrar los guionistas cuando la serie sobrepasase a la propia realidad. A nosotros nos viene al pelo para lanzar un problema sobre este surrealista efecto Droste. A saber: ¿coincidirán todas las infinitas subseries con la realidad al mismo tiempo?

Resolvamos el problema primero por la vía dura. Podemos enfocar la cuestión como un problema de cinemática. Cada subserie n se comporta como un móvil que se desplaza por un «espacio» unidimensional que marca el año ficticio τ_n en que está transcurriendo en función del año real, t. La serie original de los Alcántara ($n = 1$) arranca desde el pasado; sin pérdida de generalidad, pongamos que lo hace en $-T$. De modo que la ecuación de movimiento de la serie es:

$$\tau_1(t) = vt - T\,,$$

donde v era aproximadamente 1,07. Cuando la serie llega al origen (el año 2001, en nuestro caso) aparece la primera subserie, que arranca como el móvil 2 desde $-T$ a velocidad v^2. Así que:

$$\tau_2(t) = v^2(t - t_1) - T\,,$$

donde

$$t_1 = \frac{T}{v}$$

es el instante en que nace la nueva subserie. Y, en general, cuando la subserie n alcanza el origen, arranca la subserie $n + 1$, descrita por la ecuación:

$$\tau_{n+1}(t) = v^{n+1}(t - t_n) - T\,.$$

Es fácil ver que el instante en que surge la serie $(n + 1)$-ésima cumple:

$$t_n = t_{n-1} + \frac{T}{v^n}\,.$$

Resolviendo esta recurrencia, encontramos que:

$$t_n = \sum_{k=1}^{n} \frac{T}{v^k} = \frac{T}{v-1}\left(1 - \frac{1}{v^n}\right).$$

De modo que las ecuaciones de movimiento de dos subseries arbitrarias cualesquiera n y m serían:

$$\tau_n(t) = v^n t - T\left(\frac{v^n - 1}{v - 1}\right),$$
$$\tau_m(t) = v^m t - T\left(\frac{v^m - 1}{v - 1}\right).$$

Para calcular el instante de encuentro, $t = t^*$, basta ahora resolver $\tau_n(t^*) = \tau_m(t^*)$, que nos devuelve el valor:

$$t^* = \frac{T}{v - 1}\,.$$

Y, como el resultado es independiente de n y m, todas las subseries convergerán con la realidad al mismo tiempo.

Sin embargo, hay una manera más elegante y sencilla de demostrar esto, basada precisamente en el efecto Droste. Observemos que el tiempo ficticio τ_n de la n-ésima subserie tiene como «tiempo real» al tiempo ficticio τ_{n-1} de su subserie madre. Este es el meollo del efecto Droste (dinámico, en este caso). Así que, si la transformación de tiempos entre la realidad y la primera serie es $\tau_1(t) = vt - T$, entre la primera y la segunda subserie será:

$$\tau_2(\tau_1) = v\tau_1 - T\,.$$

Y, en general, tendremos que:

$$\tau_n(\tau_{n-1}) = v\tau_{n-1} - T\,.$$

De modo que $\tau_n(t)$ será la n-ésima composición de la transformación $\tau_1(t)$; es decir:

$$\tau_n(t) = \tau_1^{(n)}(t)\,.$$

Y puesto que

$$t^* = \frac{T}{v - 1}$$

es el único punto fijo de $\tau_1(t)$, también lo será de todas sus composiciones $\tau_n(t)$.

Qué sensación de poderío produce utilizar la herramienta matemática adecuada a un problema, ¿verdad? Ahora, a ver quién tiene el valor de explicárselo a los Alcántara. IyC

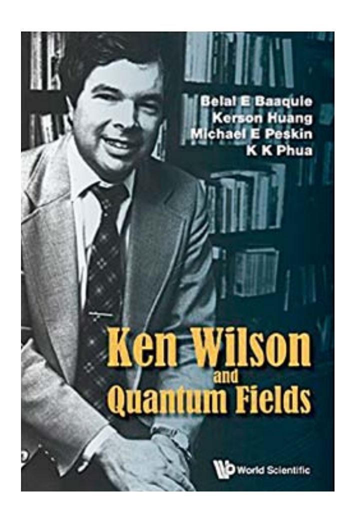
PARA SABER MÁS

Space-time dynamics in video feedback. James P. Crutchfield en *Physica D*, vol. 10, págs. 229-245, enero de 1984.

Hervir un oso. Jonathan Millán y Miguel Noguera. Editorial Belleza Infinita, 2010.

EN NUESTRO ARCHIVO

El teorema de la bola peluda. Agustín Rayo en *IyC*, agosto de 2011.



KEN WILSON MEMORIAL VOLUME
RENORMALIZATION, LATTICE GAUGE THEORY, THE OPERATOR PRODUCT EXPANSION AND QUANTUM FIELDS

Dirigido por Belal E. Baaquie, Kerson Huang, Michael E. Peskin y K. K. Phua
World Scientific, 2015

Kenneth Wilson

Tributo a uno de los físicos más profundos e influyentes del pasado siglo

El trabajo de Kenneth G. Wilson (1936-2013) ha transformado radicalmente nuestra manera de entender la mecánica estadística, la teoría cuántica de campos y la física de partículas. Hoy hablamos de «interpretación wilsoniana» o de «argumento wilsoniano» para referirnos a un punto de vista que él introdujo y que ha pasado a ser central en nuestra forma de entender la naturaleza. World Scientific dedica un volumen conmemorativo a este gran personaje de la física del siglo xx, en el que, a través de una serie de artículos de antiguos estudiantes y colegas, nos presenta las contribuciones de Wilson a la física teórica, así como la influencia que estas han tenido. La selección de temas y autores nos ofrece un buen panorama tanto de los aspectos más técnicos de su obra científica como de su personalidad.

Para valorar el cambio de pensamiento que Wilson trajo a la física teórica, conviene recordar la situación existente a finales de la década de los cincuenta, cuando este comenzó su actividad científica. La teoría cuántica de campos había conocido su momento de gloria hacía ya más de una década con la formulación de la electrodinámica cuántica (QED), pero las cosas habían cambiado mucho desde entonces.

El éxito de la teoría cuántica de campos estaba basado en gran medida en la técnica de renormalización, la cual permitía conjurar los infinitos que aparecían en los cálculos. En el caso de las llamadas teorías renormalizables, como QED, estos infinitos se podían eliminar absorbiéndolos en un número reducido de parámetros de la teoría (como las masas y las cargas), cuyos valores estaban determinados por el experimento. Aunque de esta manera se conseguía una teoría predictiva, el procedimiento de renormalización era contemplado por muchos como algo oscuro y artificial, descrito de forma muy gráfica como «barrer los infinitos bajo la alfombra».

Otra razón que había llevado a una pérdida de confianza en la teoría cuántica de campos era su fracaso a la hora de formular una teoría satisfactoria de la interacción nuclear fuerte, a imagen y semejanza de lo que QED había hecho con el electromagnetismo. Pero incluso la misma QED empezaba ser cuestionada, ya que había serias dudas de su validez a energías arbitrariamente altas.

En este contexto, durante la década de los sesenta la atención en física de partículas se desplazó hacia teorías alternativas, en particular al llamado «programa de la matriz *S*», promovido por Geoffrey Chew y cuyo objetivo era el cálculo directo de cantidades observables evitando la cuantización de los campos. Ken Wilson pertenecía, sin embargo, al reducido grupo de físicos que mantuvieron su fe en la teoría cuántica de campos en esos momentos adversos. Su trabajo cuajó en una serie de fecundos artículos que vieron la luz entre 1965 y 1975 y que cambiaron nuestra visión de la mecánica estadística, la teoría cuántica de campos y la relación entre ambas.

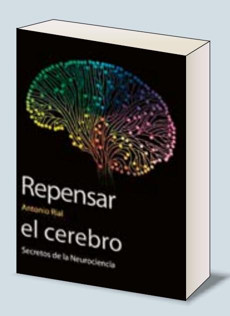
Una de las consecuencias más importantes del trabajo de Wilson fue la clarificación de lo que significaba renormalizar, más allá de la regla práctica de «absorber infinitos» en los parámetros de la teoría [*véase* «Problemas físicos con muchas escalas de longitud», por Kenneth Wilson; Investigación y Ciencia, octubre de 1979; *reeditado para* «Grandes ideas de la física», colección Temas de IyC, n.º 80, 2015]. En física de partículas, cualquier pregunta con sentido físico que nos podamos hacer está relacionada con el resultado de algún experimento. A su vez, todo experimento está caracterizado por la escala natural de energías a la cual este tiene lugar (por ejemplo, 13 teraelectronvoltios en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN) y por la precisión de nuestros detectores. Cabe entonces preguntarse de qué manera los procesos físicos a energías muy superiores a esta escala, y a las que nuestro aparato de medida no es sensible, afectan al resultado del experimento.

Wilson respondió a esta pregunta inspirándose en la manera en que la renormalización funciona en mecánica estadística. Lo que ocurre es que el efecto de la dinámica a energías muy elevadas (o, equivalentemente, a distancias muy pequeñas) está codificado en el valor de los parámetros de la teoría a energías bajas (esto es, a largas distancias). En QED, por ejemplo, el valor de la carga del electrón a una energía dada contiene información acerca de los procesos que tienen lugar a energías más altas. Por eso, su valor numérico cambia con la escala de energía del experimento, algo que ya habían descubierto Murray Gell-Mann y Francis Low en 1954.

Pero aún hay más: esa dinámica a cortas distancias, que no podemos observar directamente, genera, a distancias más largas, todas las posibles interacciones entre las partículas de la teoría que sean compatibles con las simetrías de esta. Esto no es un problema para nuestra descripción de baja energía, porque el efecto de estos acoplamientos inducidos entre las partículas —y que, en principio, son infinitos en número— son más y más pequeños a medida que aumenta su complejidad. Así, dada la precisión de nuestro experimento, solamente tenemos que incorporar un número finito de ellos en nuestros cálculos. El resto darían lugar a efectos que son cuantitativamente más pequeños que la resolución del aparato.

Esta concepción «wilsoniana» de la renormalización es también una reivindicación de las teorías no renormalizables, que habían sido consideradas hasta ese momento como no predictivas y, por lo tanto, poco menos que inútiles para la física de partículas. En realidad, tales teorías son descripciones efectivas válidas a energías por debajo de cierta escala natural que las caracteriza. En este régimen de energías, de todos los infinitos parámetros que necesitaríamos introducir para absorber los infinitos de la teoría,

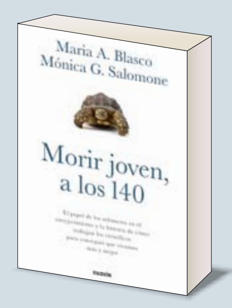
NOVEDADES



REPENSAR EL CEREBRO
SECRETOS DE LA NEUROCIENCIA
Antonio Rial
Publicaciones Universidad de Valencia, 2016
ISBN: 978-84-370-9832-6
132 págs. (14,50 €)



LA QUÍMICA DE CADA DIA
COM LA QUÍMICA ENS AJUDA A COMPRENDRE LA CUINA I MOLTES ALTRES COSES
Claudi Mans
Ediciones de la Universidad de Barcelona, 2016
ISBN: 978-84-475-3974-1
268 págs. (23 €)



MORIR JOVEN, A LOS 140
EL PAPEL DE LOS TELÓMEROS EN EL ENVEJECIMIENTO Y LA HISTORIA DE CÓMO TRABAJAN LOS CIENTÍFICOS PARA CONSEGUIR QUE VIVAMOS MÁS Y MEJOR
Maria A. Blasco y Mónica G. Salomone
Paidós, 2016
ISBN: 978-84-493-3206-7
256 págs. (17,95 €)

solamente un número finito de ellos es suficientemente importante para describir nuestro experimento.

Esta idea es especialmente iluminadora cuando la aplicamos a la gravedad. A escalas de energía muy por debajo de la energía de Planck (unos 10^{19} gigaelectronvoltios, GeV), la gravedad cuántica es perfectamente consistente y predictiva: la interacción gravitacional es débil y, a una precisión dada, tan solo necesitamos tener en cuenta un número finito de acoplamientos. Es solamente cuando nos acercamos a la energía de Planck que ya no podemos truncar los infinitos parámetros que caracterizan a la teoría, al ser todos del mismo orden de magnitud. En ese momento, es necesario sustituir la relatividad general por una teoría que la complete a energías por encima de la escala de Planck. Aunque hay candidatos para esta teoría completa de la gravedad cuántica —por ejemplo, la teoría de supercuerdas—, por el momento desconocemos sus detalles.

El llamado problema de la naturalidad, ahora central en la física de partículas, puede retrotraerse también al trabajo de Wilson. En 1971, el investigador argumentó que sería improbable encontrar partículas escalares ligeras en la naturaleza, ya que sus autointeracciones las harían tan pesadas que resultarían indetectables. Este problema es de gran relevancia en el modelo estándar, ya que es muy difícil entender por qué el bosón de Higgs, una partícula escalar, tiene una masa de 125 GeV, mucho menor que la escala natural de la teoría, que en principio sería la energía de Planck o la de gran unificación (en torno a 10^{16} GeV). La solución satisfactoria a esta cuestión es todavía uno de los grandes problemas conceptuales abiertos en la física de altas energías.

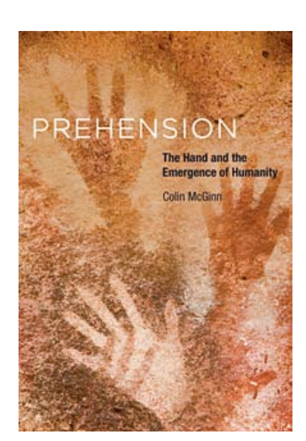
Wilson fue también pionero en el uso sistemático de ordenadores para el estudio de problemas fundamentales en física. En 1974 propuso formular la teoría cuántica de campos en un espaciotiempo discreto; esto es, en una red o retículo cúbico de cuatro dimensiones, caracterizado por la distancia entre puntos contiguos. Esta formulación reduce la teoría de campos a un sistema semejante a los estudiados en mecánica estadística y que puede simularse en un ordenador. La teoría original en el espaciotiempo continuo reaparece asociada a transiciones de fase en este sistema discreto. La idea ha sido extremadamente fructífera, ya que la teoría cuántica de campos en el retículo (*lattice gauge theory*) es en la actualidad la mejor fuente de información cuantitativa de la que disponemos para estudiar problemas como el confinamiento en cromodinámica cuántica (QCD).

Ken Wilson recibió el premio Nobel de física en 1982 por sus trabajos sobre mecánica estadística y transiciones de fase. En 1988 abandonó la Universidad Cornell, en la que había trabajado desde 1963, para trasladarse a la Universidad estatal de Ohio, en Columbus. Aunque sin abandonar completamente su trabajo en física de partículas, en esta segunda parte de su carrera su interés se trasladó en gran medida al problema de la educación. Su principal preocupación fue diseñar una reforma educativa que mejorase la formación científica de las nuevas generaciones, haciendo hincapié en que la física debe ser presentada como un viaje activo de descubrimiento que convierta a los jóvenes en protagonistas de su propio aprendizaje, y no como una árida lista de resultados para memorizar.

La influencia del legado intelectual de Wilson se extiende a muchos ámbitos. Puede resultar sorprendente que nuestros intentos por entender la naturaleza a lo largo de los siglos hayan tenido éxito sin que, para ello, fuera necesario conocer todos los detalles acerca de cómo está constituido el mundo a todas las escalas. Pero este hecho —que está detrás de la misma posibilidad del progreso científico— se explica «wilsonianamente» en tanto que, a una determinada escala de distancias, los detalles microscópicos están codificados en un conjunto relativamente pequeño de parámetros que pueden medirse.

Esta es la razón por la que Newton pudo formular las leyes del movimiento sin saber cómo interaccionaban los átomos entre sí, o Lavoisier las leyes de la química sin conocer la estructura electrónica de los átomos. Desde este punto de vista, es posible contemplar la historia de la física como un descenso en las escalas de distancia, una resolución progresiva de esos parámetros «wilsonianos» en términos de otros referidos a distancias más pequeñas, simultáneamente al descubrimiento de los grados de libertad «adecuados» (átomos, electrones y núcleos, o partículas elementales) para describir la física a tales escalas.

—Miguel Á. Vázquez-Mozo
Instituto Universitario de Física Fundamental y Matemáticas
Universidad de Salamanca



PREHENSION
THE HAND AND THE EMERGENCE OF HUMANITY
Colin McGinn
MIT Press, 2015

Hominización

Asociación de útiles líticos y restos óseos

La especie humana posee lenguaje, pensamiento racional, cultura y un ámbito afectivo característicos. ¿Cómo llegamos a ser lo que somos? Para Charles Darwin en *The descent of man*, el secreto de nuestro éxito evolutivo radicó en la mano. Hace más de 80 años, Louis Leakey halló útiles de piedra en Olduvai. Decenios más tarde, con su mujer, Mary, y su equipo, encontró huesos de una especie que los Leakey bautizaron con el nombre de *Homo habilis*. Así surgió la idea de la asociación entre nacimiento de la técnica y aparición del género *Homo*. Los útiles más antiguos de Olduvai y los primeros fósiles de *Homo* tienen una edad de 2,6 millones de años.

Cuando nuestros remotos antepasados descendieron de los árboles, adoptaron un andar bípedo que dejaba libres las manos, propiciando así la cooperación social y el aumento de la capacidad cerebral. Colin McGinn les atribuye un papel principal en el desarrollo del lenguaje. Llegamos a ser lo que somos —inteligentes, creadores, diestros y proclives a la ansiedad— por nuestras manos. La interacción entre cerebro y mano permitió que los humanos hallaran su nicho ecológico a través del descubrimiento de los útiles materiales, amén de los útiles mentales (lenguaje y símbolos matemáticos). No abunda, sin embargo, *Prehension* en pruebas que respalden un discurso más o menos ingenioso. Se trata, a la postre, de un ensayo sobre la naturaleza de la humanidad, que pretende cubrir el vacío existente en el conocimiento de la transición desde los antepasados simiomorfos al hombre moderno.

El papel de la mano en la evolución de la naturaleza humana se ha reconocido desde hace tiempo. En 1833, Charles Bell publicó *The hand: Its mechanism and vital endowments, as evincing design*, donde sostenía que solo un creador divino podía haber realizado algo tan maravilloso y adaptado. Darwin le asignó una posición dominante en la emergencia del hombre. Por ella llegamos a ser lo que somos, tesis desarrollada por Napier en *The roots of mankind* (1970) y *Hands* (1980). En 1998, Frank R. Wilson retomó la idea de la centralidad de la mano en *The hand: How its use shapes the brain, language, and human culture,* para subrayar su estrecha relación con el cerebro. McGinn centra esa relación en el lenguaje. Con mayor singularidad: la mano humana explica la transición definitiva hacia la hominización.

La mano hizo posible la transición, sirviendo de puente o de mecanismo mediador. Destinada en su origen a la locomoción y desenvolvimiento en un medio arbóreo, recolección de frutos y defensa o ataque, poco a poco fue preadaptándose, primero con dedos aptos para asir. La mano fue liberándose de la locomoción con la postura erecta y se acomodó a otros fines. Ello condujo a un proceso de coevolución entre mano y cerebro, a medida que el cerebro fue aumentando su volumen y su capacidad para subvenir a las necesidades de la mano en sus nuevas tareas. Por eso, no debe sorprendernos que una cantidad importante de tejido cerebral esté reservada a la mano. Este órgano necesita, a todas luces, un computador potente para supervisar sus operaciones. En un diagrama corporal del homúnculo, el pulgar ocupa la extensión de una pierna, lo que representa que hay la misma cantidad de corteza dedicada al pulgar que a esa extremidad. Parte de esa maquinaria cortical está dedicada a la función motora y parte a la función sensorial. La mano no solo es un instrumento motor importante, sino también un órgano muy inervado para la sensación y la percepción. Los inconvenientes de una deambulación bípeda (problemas de equilibrio, fragilidad de la espina dorsal, marcha lenta) se irían compensando con la adaptación y nueva conformación. Las manos libres resultaban más importantes para la supervivencia.

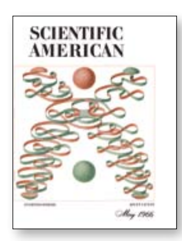
Un individuo que se sirve de instrumentos ha de poseer pensamiento creador y pensamiento teleológico. Aves y hormigas pueden construir estructuras impresionantes que les sirven para su supervivencia, pero no han adquirido pensamiento creador ni finalista. No se trata del mero uso de herramientas, sino del estado mental, interno, de dicho uso. Por creatividad se entiende la capacidad para intuir un nuevo uso. Eso es peculiar de la inteligencia, la capacidad de solucionar problemas. Además, el animal debe ser capaz de establecer un razonamiento sistemático de medios y fines. Eso requiere tener conceptos teleológicos, trabajar hacia un fin.

Con todo, el libro de McGinn ignora los hallazgos recientes. La mano humana se distingue de la de otros primates por una serie de rasgos morfológicos que se consideran ventajosos para apretar con fuerza y precisión; en particular, la configuración morfológica de los dedos y del pulgar oponible es crítica para la destreza en el manejo de objetos. Sin embargo, se desconoce cuándo y por qué apareció esa morfología en el curso de la evolución. En enero del año pasado, el equipo liderado por Matthiew M. Skinner y Tracy L. Kivell puso de manifiesto que *Australopithecus africanus* (que vivió hace entre dos y tres millones de años) y varios homininos del Pleistoceno, a los que tradicionalmente se les negaba habilidad en la preparación de herramientas, presentaban, en los metacarpos, un patrón óseo trabecular similar al humano, coherente con una oposición vigorosa del pulgar. Estos resultados apoyan el uso de útiles líticos entre los australopitecos y aportan una prueba morfológica de que los homininos del Pleistoceno alcanzaron posturas de la mano parecidas a las humanas mucho antes de lo que se venía admitiendo.

Las lascas, bifaces y otros objetos que se han encontrado pueden acabar con la tesis que afirma que la fabricación de útiles complejos comenzó con la aparición de *Homo*. Los artefactos de 3,3 millones de años exhibidos en la Conferencia Anual de la Sociedad Americana de Paleoantropología, celebrada el 14 de abril de 2015, anteceden a la aparición de los primeros restos de *Homo* y sugieren que los precursores homininos tenían inteligencia y destreza capaces de fabricar útiles refinados.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Mayo 1966

El efecto Josephson

«Hace cuatro años, Brian D. Josephson, joven estudiante de posgrado de física en la Universidad de Cambridge, hizo una predicción asombrosa. Basándose en un análisis puramente teórico del fenómeno de la superconductividad (la desaparición repentina de la resistencia eléctrica de ciertas sustancias a temperaturas cercanas al cero absoluto), llegó a la conclusión de que, en principio, por un intersticio aislante intercalado entre dos cuerpos superconductores podría hacerse fluir una "supercorriente" constituida por pares de electrones correlacionados, con tal de que el intersticio fuera lo bastante estrecho. Sugirió, además, que ese "entunelamiento" de pares de electrones a través de un aislante podría revestir dos formas, que ya se conocen como efectos Josephson. Ambas se han observado en experimentos recientes.»

Josephson recibió en 1973 el premio Nobel de física por estos trabajos.

Proceso a Detroit

«Reseña del libro *Unsafe at any speed: The designed-in dangers of the American automobile* ("Inseguro a cualquier velocidad: Los peligros asociados al diseño del automóvil estadounidense"), por Ralph Nader. Grossman Publishers, 1965 (5,95 dólares). Durante decenios hemos seguido la política de conseguir la mayor seguridad en los automóviles a base de campañas legislativas sobre conducción, aplicación de la ley, educación técnica y concienciación moral. Este enfoque ha tenido, y para muchos aún tiene, la fuerza de un compromiso ideológico. El libro de Nader puede considerarse como un análisis y una crítica de tal ideología. Es un texto beligerante que acusa a los fabricantes de automóviles de indiferencia, insensibilidad y arrogancia ante las auténticas posibilidades de diseñar vehículos más seguros. En su conclusión, Nader aboga por unas normas de diseño y fabricación de dominio público y ámbito de aplicación federal, apoyadas en una investigación incesante. —*David Hawkins*»



Mayo 1916

Noticias de la guerra

«Tras casi cinco meses de asedio, las fuerzas británicas bajo el mando del general Townshend en Kut el Amara, en Mesopotamia, se han visto obligadas a rendirse. Esa fuerza, que inicialmente constituía la columna móvil que intentó tomar Bagdad, se había reducido en el momento de la rendición a algo menos de 10.000 hombres. Lo que llevó a esta cifra insignificante de efectivos fueron las bajas sufridas durante la marcha sobre Bagdad, la retirada de la batalla de Ctesifonte y el posterior cerco a Kut. Las causas principales de la rendición del general Townshend fueron la falta de víveres y municiones y la escasez de material sanitario.»

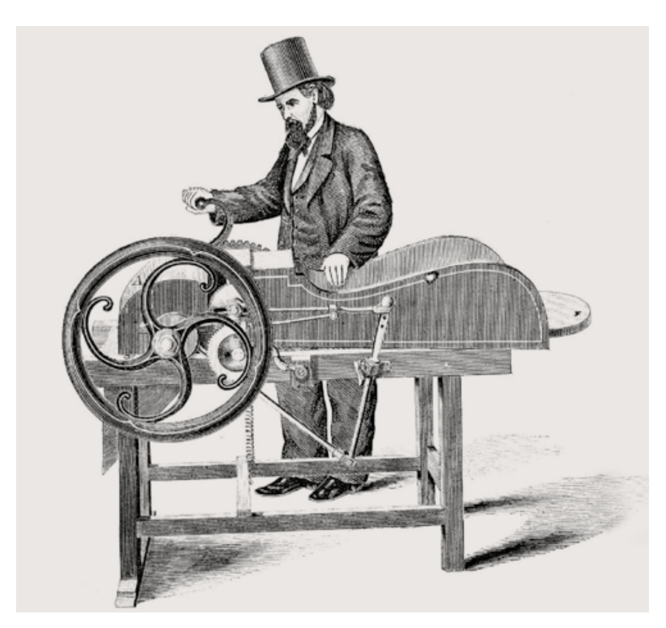
Los defensores perdieron Kut pese a que fueron los primeros en la historia militar en ser reabastecidos desde el aire.



Mayo 1866

Nuevas técnicas agrícolas

«Existe una demanda regular y sostenida de implementos agrícolas de calidad. Los agricultores no cesan de buscar los que más les convienen por su duración y utilidad, y están dispuestos, a juzgar por las cifras de venta de todas las variedades, a probarlos con imparcialidad y sin prejuicios. En el grabado [*véase la ilustración*] se muestra una nueva cortadora para trocear forraje recientemente introducida en el Oeste [en este caso, en Richmond, Indiana]. Es de construcción sólida y, de sufrir un accidente, puede repararla cualquier mecánico o herrero ordinarios.»



Máquinas para la agricultura: cortadora de forraje. Su orgulloso inventor probablemente vestiría sus mejores ropas para este grabado de 1866.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XIV, N.º 19, 6 DE MAYO DE 1866

Aire viciado

«El vapor *Virginia* arribó hace poco a este puerto con una lista numerosa de pasajeros enfermos. Fue inmediatamente puesto en cuarentena, con los enfermos atendidos y aislados de la ciudad hasta que sanaron. Las investigaciones de los funcionarios competentes demuestran que ninguno de los pasajeros procedía de puertos infectados de cólera, y que la enfermedad no se declaró a bordo hasta al cabo de ocho días de la partida de Liverpool del *Virginia*. Parece que la ventilación era tan defectuosa que afectó mucho a los pasajeros, y que estos, debilitados por un aire viciado y una alimentación insuficiente, resultaban especialmente vulnerables. Extraña no poco que, con todos los aparatos modernos para conseguir aire fresco y crear una circulación a fondo en los pisos, se preste a ello tan poca atención. La pérdida que para los propietarios supuso la retención del buque asciende a una suma elevada, y, si no por humanidad, al menos por consideración a las ganancias deberían interesarse más por el bienestar del pasaje de tercera clase.»

EVOLUCIÓN HUMANA

¿Cómo influyó la talla de herramientas en la cognición humana?

Dietrich Stout

Las imágenes cerebrales obtenidas durante la fabricación de hachas líticas revelan aspectos clave sobre la evolución de nuestras capacidades cognitivas.

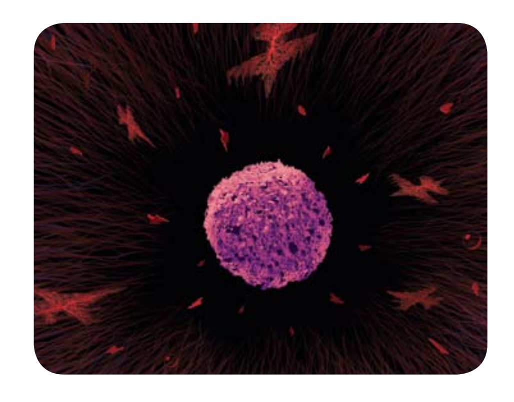


INFORME ESPECIAL: EL FUTURO DE LA MEDICINA

La defensa contra el cáncer

Karen Weintraub

Una nueva generación de tratamientos que potencian el propio sistema inmunitario ofrecen una vía prometedora en la batalla contra la enfermedad.



FÍSICA DE PARTÍCULAS

El enigma del neutrón

Geoffrey L. Greene y Peter Geltenbort

Dos experimentos de precisión arrojan valores distintos para el tiempo que tarda el neutrón en desintegrarse. ¿Se trata de un error experimental o hay un misterio más profundo?

HISTORIA DE LA CIENCIA

Alexander Grothendieck, de eminencia a eremita

Winfried Scharlau

La extraordinaria vida de uno de los mejores matemáticos del mundo.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Clara Moskowitz, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
PUBLISHER AND VICE PRESIDENT Jeremy A. Abbate

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes*; Blanca Álvarez: *Apuntes*; Juan Pedro Adrados: *El problema de la constante de la gravitación universal*; Marián Beltrán: *El misterioso* Homo naledi; Yago Ascasibar: *El rompecabezas de la energía oscura*; Rosa Pujol: *Drenaje cerebral*; Alfredo Marcos: *Las leyes en ciencia*; José Óscar Hernández Sendín: *Breve historia de la criomicroscopía electrónica*; Fabio Teixidó: *Los refugiados sirios, víctimas del cambio climático*; Guzmán Sánchez: *La brújula celular*; Juan Manuel González Mañas: *Un interruptor para la terapia génica*; Javier Grande: *Curiosidades de la física*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España


Emidio Tucci®
TUS COMPRAS EN
tienda | web | móvil
75 Aniversario
El Corte Inglés